

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

**Análise de Soluções Construtivas para a Verificação de
Requisitos Térmicos e Acústicos em Edifícios de Habitação**

Por

Gonçalo Tomaz Lopes Almeida

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em **Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios**

Orientador Científico

Prof. Doutor Vasco Moreira Rato

Lisboa

2009

Agradecimentos

Manifesto o meu agradecimento,

Ao professor Doutor Vasco M. Rato, orientador científico da dissertação, pela disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos durante a dissertação e durante todos os anos de faculdade, pela ajuda na superação de todas as dificuldades, pelo incentivo permanente e por todas as horas dispendidas comigo.

Aos meus Pais, João e Anabela, por terem sempre acreditado que seria possível aqui chegar, mesmo quando eu tinha dúvidas.

Ao meu irmão, Filipe, companheiro de todas as batalhas.

À minha família, por todo o apoio directo ou indirecto durante a minha longa vida de estudante.

Ao Eng. Diogo Mateus, pela paciência, pela prontidão no esclarecimento de dúvidas e pela disponibilidade imediata na entrega de elementos fundamentais para a elaboração desta dissertação.

À empresa Infinittech Engenharia e ao Eng. Eduardo Fontes, pela compreensão e apoio prestado desde o início da elaboração da dissertação.

Ao Eng. Arq. Pinto Coelho, pela ajuda no esclarecimento de dúvidas e disponibilidade apresentada.

A todas as empresas contactadas, pela disponibilidade na entrega de informação e a ajuda prestada.

A todos os meus amigos, por estarem aí!

Resumo

As preocupações ambientais e de conforto no interior das habitações têm registado um importante crescimento nos últimos anos.

Como resposta a estas crescentes preocupações surgiram vários regulamentos, entre os quais se destaca, pela elevada importância para o desenvolvimento desta dissertação, o RCCTE e o RRAE. O RCCTE surge para regular a vertente térmica dos edifícios, contabilizando os gastos energéticos associados à manutenção de um nível de conforto razoável no seu interior, e o RRAE surge para regular a vertente acústica nos edifícios, obrigando a verificação *in situ* e após a obra concluída de mínimos regulamentares de isolamento acústico.

Nesta dissertação foi inicialmente efectuado um levantamento das soluções mais comumente utilizadas em Portugal na construção de edifícios de habitação assim como algumas das soluções mais inovadoras, no que respeita ao comportamento térmico e acústico.

Após o levantamento feito contabilizou-se 207 soluções construtivas, estando estas divididas em seis grupos principais. Estes grupos são: Paredes Simples, Paredes Duplas, Paredes Leves, Pavimentos, Revestimentos de Piso e Envidraçados.

Com base nos dois regulamentos, RCCTE e RRAE, e finalizado o levantamento das soluções construtivas, efectuaram-se várias comparações entre as soluções existentes em cada grupo de soluções. Estas comparações tiveram como objectivo encontrar, para cada grupo de soluções, qual ou quais as soluções que melhor cumprem os requisitos regulamentares existentes no RCCTE e no RRAE.

Além da análise das soluções construtivas também foi feita uma pequena análise à fiabilidade da expressão de cálculo utilizada na definição do índice de isolamento sonoro das várias soluções, R_w , uma vez que existem actualmente inúmeras expressões adaptadas por vários autores que tentam reflectir através do resultado das expressões o verificado *in situ*.

Palavras-Chave

RCCTE, Comportamento Térmico, RRAE, Comportamento Acústico, Soluções Construtivas.

Abstract

The environmental concerns as well as the inner comfort in the residential buildings have been increasing for a long time.

As a response to these growing concerns, several regulations have been set, giving a special emphasis to the RCCTE (thermal comfort and energy) and RRAE (acoustic comfort) for its importance to this dissertation. RCCTE was set to regulate the climate issue of the buildings, associating the energy requirements to the maintenance of an adequate inner comfort; RRAE was set to regulate the sound issues of the buildings, forcing an in-situ checking as well as minimal regulations of sound insulation after the construction.

The most common constructive solutions used in Portugal for residential buildings were firstly investigated, as well as some of the most innovative ones in what concerns the thermal and acoustic behavior.

207 constructive solutions were calculated, divided into six main groups: single leaf walls, double leaf walls, lightweight walls, floors and pavements, floor coatings and window systems.

Based on the two regulations, RCCTE and RRAE, and after the investigation on the constructive solutions, several comparisons were established in each group.

The aim of these comparisons was to find out the best solution, the one (or the ones) that are better suited to the requirements of both regulations.

Besides the analysis of the constructive solutions, a short analysis was also performed regarding the reliability of the expression used to calculate the airborne sound insulation rate, R_w , since several expressions are being adopted by many authors who have been adapting this calculation method according to the results of *in situ* testing.

Key Words

RCCTE, Thermal Behaviour, RRAE, Acoustic Behaviour, Constructive Solutions.

I – Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objectivos	1
1.3. Metodologia	2
2. Comportamento Acústico.....	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Considerações Teóricas.....	3
2.2.1. Ouvido Humano	3
2.2.2. Som.....	5
2.2.3. Comprimento de Onda e Frequência.....	10
2.2.4. Pressão Sonora.....	12
2.2.5. Potência Sonora.....	15
2.2.6. Intensidade Sonora	15
2.2.7. Tipos de Fontes de Som Aéreo	16
2.2.8. Banda de Frequências	18
2.2.9. Curvas Isofónicas.....	20
2.2.10. Ponderação.....	21
2.2.11. Condições Atmosféricas.....	24
2.2.12. Ruído	26
2.2.13. Acústica em Edifícios	31
2.2.14. Condicionamento Acústico	33
2.3. Propagação Sonora por Via Aérea.....	48
2.3.1. Método de Medição.....	49
2.3.2. Método de Previsão	59
2.3.3. Heterogeneidades.....	65
2.3.4. Transmissão Marginal	69
2.4. Propagação Sonora por Via Sólida de Sons de Percussão.....	75
2.5. Equipamento de Medição.....	84
2.6. Requisitos Regulamentares	86
2.7. Exemplos Construtivos.....	90
3. Comportamento Térmico	93
3.1. Introdução.....	93
3.2. Directiva Europeia 2002/91/CE	93

3.3. RCCTE	94
3.3.1. Dados Climáticos	95
3.3.2. Coeficiente de Transmissão Térmica	96
3.3.3. Inércia Térmica.....	98
3.3.4. Pontes Térmicas	101
3.3.5. Factor de Forma.....	102
3.3.6. Factor Solar.....	103
3.3.7. Necessidades Energéticas	105
4. Cálculo de Soluções Construtivas.....	111
5. Análise de Resultados	133
6. Síntese Global	155
7. Conclusões Gerais.....	161
8. Sugestões de Trabalhos Futuros	163
9. Bibliografia.....	165
9.1. Bibliografia Geral.....	165
9.2. Normas	167
9.3. Internet, Publicações.....	168
ANEXOS.....	169
A.1 – Paredes Simples.....	170
A.2 – Paredes Duplas	172
A.3 – Paredes Leves.....	174
A.4.1 – Pavimentos.....	177
A.4.2 – Pavimentos.....	179
A.5.1 – Revestimentos de Piso	181
A.5.2 – Revestimentos de Piso	183
A.6 – Envidraçados.....	185

II – Índice de Figuras

Figura 2.1 – Ouvido Humano. [W.5].....	3
Figura 2.2 – Variação de pressão ao longo do tempo. [18]	5
Figura 2.3 – Frequências audíveis.....	7
Figura 2.4 – Sensibilidade Auditiva. [11]	7
Figura 2.5 – Exemplos de sons produzidos por instrumentos musicais. [20].....	8
Figura 2.6 – Som puro. [20]	8
Figura 2.7 – Diapasão. [W.15]	8
Figura 2.8 – Diferenças de pressão provocadas pelo diapasão. [20]	8
Figura 2.9 – Comportamento das moléculas de ar. [W.16].....	9
Figura 2.10 – Propagação de uma onda sonora ao longo do tempo. [20]	9
Figura 2.11 – Sinal real e sinal captado. [11]	10
Figura 2.12 – Pressão ao longo de um comprimento. [9]	11
Figura 2.13 – Pressão ao longo do tempo. [9].....	11
Figura 2.14 – Resposta do ouvido humano (nível de pressão sonora) em função da pressão sonora eficaz. [11].....	13
Figura 2.15 – Acréscimo de pressão sonora devido à emissão sonora de duas fontes. [20]	14
Figura 2.16 – Escala musical. [W.23].....	18
Figura 2.17 – Representação das bandas de frequência. [20]	20
Figura 2.18 – Curva isofónica. [20]	20
Figura 2.19 – Curva isofónica. [11]	21
Figura 2.20 – Curva isofónica.	22
Figura 2.21 – Curva de ponderações. [20]	23
Figura 2.22 – Influência do vento nas ondas sonoras. [20]	24
Figura 2.23 – Influência da temperatura nas ondas sonoras. [20].....	25
Figura 2.24 – Influência da temperatura nas ondas sonoras. [20].....	25
Figura 2.25 – Ruído contínuo.....	29
Figura 2.26 – Ruído intermitente.....	29
Figura 2.27 – Ruído impulsivo.	30
Figura 2.28 – Ruído flutuante.....	30
Figura 2.29 – Ruído tonal.....	30
Figura 2.30 – Ruído de baixa frequência.	31
Figura 2.31 – Câmara anecóica. [20]	33
Figura 2.32 – Câmara reverberante. [20]	33
Figura 2.33 – Tempo de reverberação. [11]	35
Figura 2.34 – Tempos de reverberação ideais para alguns tipos de salas. [11]	39

Figura 2.35 – Pannel ressonante. [20]	40
Figura 2.36 – Ressorador de Helmholtz. [20]	42
Figura 2.37 – Absorção sonora de dois ressoadores diferentes ao logo da frequência. [20]	44
Figura 2.38 – Pannel perfurado. [20].....	45
Figura 2.39 – Absorção sonora, por frequência e por tipo de material. [11]	46
Figura 2.40 – Exemplos do comportamento das ondas sonoras no interior de uma sala. [20]	47
Figura 2.41 – Exemplos do comportamento das ondas sonoras no interior de uma sala. [20]	48
Figura 2.42 – Exemplo de laboratório de medição de isolamentos a sons aéreos. [20]	50
Figura 2.43 – Curva de referência.....	56
Figura 2.44 – Isolamento por frequência. [20].....	59
Figura 2.45 – Modelo inercial. [20].....	60
Figura 2.46 – Frequência critica. [20].....	61
Figura 2.47 – Isolamento por frequência. [20].....	62
Figura 2.48 – Isolamento pela “Lei da Massa”. [11].....	62
Figura 2.49 – Isolamento conferido pela colocação de um pano adicional. [20]	63
Figura 2.50 – Variação do isolamento acústico de elementos compostos.....	67
Figura 2.51 – Variação do isolamento com as áreas dos vários elementos que constituem um elemento compostos.	67
Figura 2.52 – Parede de alvenaria de tijolo bastante permeável.	69
Figura 2.53 – Redução do isolamento sonoro por percentagem de abertura. [18]	69
Figura 2.54 – Formas de transmissão sonora. [20]	70
Figura 2.55 – Transmissão marginal. [20].....	72
Figura 2.56 – Tipos de sons. [18].....	76
Figura 2.57 – Laboratório de percussão. [20].....	77
Figura 2.58 – Curva de referência para sons de percussão.	80
Figura 2.59 – Sonómetro. [W.6]	84
Figura 2.60 – Calibrador. [W.6]	85
Figura 2.61 – Amplificador e fonte omnidireccional. [W.6].....	85
Figura 2.62 – Máquina de percussão. [W.6].....	85
Figura 2.63 – RRAE aplicável a edifícios habitacionais e mistos. [9].....	90
Figura 3.1 – Zonas Climáticas de Inverno. [N.10]	96
Figura 3.2 – Zonas Climáticas de Verão. [N.10].....	96
Figura 3.3 – Exemplos de quantificação de massas superficiais. [20].....	99
Figura 3.4 – Exemplos de factores forma. [20].....	103
Figura 3.5 – Exemplo de factores forma para dois edifícios de igual volume. [20]	103
Figura 3.6 – Energia Solar incidente sobre um envidraçado. [20]	104

Figura 3.7 – Trocas térmicas na estação de aquecimento. [20]	105
Figura 3.8 – Radiação incidente sobre o envidraçado. [20].....	107
Figura 3.9 – Trocas térmicas na estação de arrefecimento. [20]	107
Figura 4.1 – Gráfico da diferença entre o valor teórico (calculado) e o valor dado pelo fornecedor ou obtido <i>in situ</i> (experimental) do R_w	131
Figura 4.2 – Gráfico comparativo entre o valor teórico e o valor experimental de R_w	131

III – Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Velocidade de propagação do som em vários meios. [W.11].....	6
Quadro 2.2 – Atenuação sonora por km. [11].....	12
Quadro 2.3 – Atenuação sonora por metro. [11]	12
Quadro 2.4 – Bandas de Frequência.	19
Quadro 2.5 – Ponderações.	23
Quadro 2.6 – Efeitos nocivos por níveis sonoros. [W.4]	27
Quadro 2.7 – Coeficientes de absorção por frequência. [20].....	42
Quadro 2.8 – Coeficientes de absorção por frequência. [20].....	43
Quadro 2.9 – Coeficientes de absorção por frequência. [20].....	45
Quadro 2.10 – Valores da curva de referência.....	55
Quadro 2.11 – Valores da curva de referência.....	56
Quadro 2.12 – Tipos de fonte de ruído rosa e de tráfego urbano.....	57
Quadro 2.13 – Valores da curva de referência de ruído rosa e de tráfego urbano.	58
Quadro 2.14 – Características da caixa de ar.	65
Quadro 2.15 – Características do material absorvente.	65
Quadro 2.16 – Características dos panos.	65
Quadro 2.17 – Transmissão marginal [20].	71
Quadro 2.18 – Curva de referência para sons de percussão.	78
Quadro 2.19 – Curva de referência para sons de percussão.	79
Quadro 2.20 – Reduções globais na transmissão de ruídos de percussão com laje flutuante. [11].....	81
Quadro 2.21 – Valores da correcção devido à ocorrência de transmissão marginal. [N.2] ...	82
Quadro 2.22 – RRAE aplicável a edifícios habitacionais e mistos.....	88
Quadro 2.23 – Isolamento acústico de algumas soluções construtivas. [9] [11] [18]	91
Quadro 3.1 – Correcção devida ao revestimento interior, r_i . [19]	100
Quadro 3.2 – Classes energéticas.	110
Quadro 4.1 – Paredes Simples.	116
Quadro 4.2 – Paredes Duplas.....	117
Quadro 4.3 – Paredes Leves.	117
Quadro 4.4 – Pavimentos.	119
Quadro 4.5 – Revestimentos de Pavimento.	119
Quadro 4.6 – Envidraçados.	119
Quadro 4.7 – Cumprimento Regulamentar	121
Quadro 4.8 – Percentagem da diferença para os mínimo regulamentar e posição.	126

Quadro 5.1 – Comparação das características de materiais construtivos com espessura iguais/semelhantes.	137
Quadro 5.2 – Variação das características com a variação de isolamento.....	142
Quadro 5.3 – Comparação entre placas de gesso cartonado de 12,5 mm e placas de 15 mm.	143
Quadro 5.4 – Comparação das características térmicas e acústicas de uma solução com o mesmo isolamento térmico mas com diferentes camadas de PGC.....	144
Quadro 5.5 – Comparação da evolução das características térmicas e acústicas.	147
Quadro 5.6 – Efeitos de alguns revestimentos de pavimento numa solução construtiva....	148
Quadro 5.7 – Índice R_w de envidraçados com a mesma espessura global.....	151

1. Introdução

1.1. Introdução

Neste momento, em Portugal, existem dois regulamentos muito importantes na construção de edifícios, são eles o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) e o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

O RRAE é o regulamento que regula a vertente do conforto acústico de edifícios novos ou edifícios existentes que venham a ser objecto de reconstrução, ampliação, ou alteração, tendo como objectivos principais a melhoria da qualidade do ambiente acústico, o bem-estar e saúde das populações.

O RCCTE é o regulamento que considera a vertente térmica do mesmo tipo de edifícios que o RRAE mas este tem como objectivo a obtenção de condições de conforto térmico e higrotérmico num contexto de minimização de consumos de energia. Por outro lado, o conjunto RCCTE / Sistema de Certificação Energética pretende informar o utente, potencial proprietário ou locatário de um edifício ou fracção independente, sobre as características térmicas do produto/imóvel que lhe é oferecido, as quais irão influenciar necessariamente os custos de funcionamento de sistemas para manutenção de um ambiente interior confortável.

Logo, ambos os regulamentos têm como objectivo comum a melhoria do conforto no interior dos edifícios, contudo nem sempre as melhores soluções de isolamento acústico são as melhores soluções de isolamento térmico e vice-versa. Considera-se pois que a definição de soluções construtivas que permitam responder aos requisitos exigências destes dois regulamentos constitui uma área de trabalho muito pertinente no actual contexto da construção em Portugal.

1.2. Objectivos

Este trabalho tem como objectivo a avaliação de soluções construtivas de compartimentação interior e exterior de edifícios de habitação face aos requisitos exigências de conforto acústico e de conforto térmico, no contexto da sua viabilidade construtiva.

1.3. Metodologia

Para a realização deste trabalho os requisitos de isolamento acústico são mais condicionantes do que os de isolamento térmico. Efectivamente, à luz da prática construtiva corrente, bem como do facto de a respectiva verificação ser realizada após construção, o primeiro tipo de exigências afigura-se como mais complexo de cumprir. Deste modo, inicialmente, será feito um levantamento de soluções construtivas (interiores e exteriores) de isolamento acústico aplicáveis em edifícios de habitação.

Após o levantamento dessas soluções, irá estudar-se o seu nível de isolamento a sons aéreos, a sons de percussão, bem como o seu cumprimento face ao RRAE.

Para todas as soluções que sejam levantadas para a análise de cumprimento ao RRAE será efectuado um estudo sobre o isolamento térmico, recorrendo ao RCCTE.

Após efectuar estes estudos, serão analisadas todas as soluções que cumpram ambos os regulamentos, acústica e térmica, e será apresentado para cada tipo de solução qual ou quais das soluções analisadas têm o melhor equilíbrio entre o isolamento acústico e térmico.

Por fim, será efectuado um pequeno estudo comparativo entre todas as soluções, conferindo diferentes ponderações à contribuição acústica e térmica de cada solução, e será analisado, para os casos em que haja informação, a divergência entre os valores de isolamento acústico obtidos teoricamente, pelas expressões de cálculo, e os valores obtidos pelos fornecedores/medições *in situ*.

2. Comportamento Acústico

2.1. Introdução

Neste capítulo são definidas algumas considerações teóricas acústicas fundamentais para a percepção da problemática da acústica nos edifícios de habitação.

Para além das considerações teóricas também são apresentados os métodos de medição e de previsão utilizados *in situ* e em fase de projecto, respectivamente.

Por fim, encontra-se resumido os requisitos regulamentares acústicos existentes actualmente em Portugal, que irão servir de base para o desenvolvimento desta dissertação, e algumas comparações de isolamento acústico de algumas soluções construtivas utilizadas em Portugal.

2.2. Considerações Teóricas

2.2.1. Ouvido Humano

O ouvido humano é um órgão altamente sensível que permite que o ser humano consiga perceber e interpretar ondas sonoras numa gama muito ampla de frequências, entre os 20 e os 20.000 Hz, desempenhando assim um papel importante na comunicação. Além da comunicação, o ouvido humano também tem um papel importante no equilíbrio do corpo.

O ouvido humano é constituído essencialmente por três partes principais: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno [W.20] [W.5].

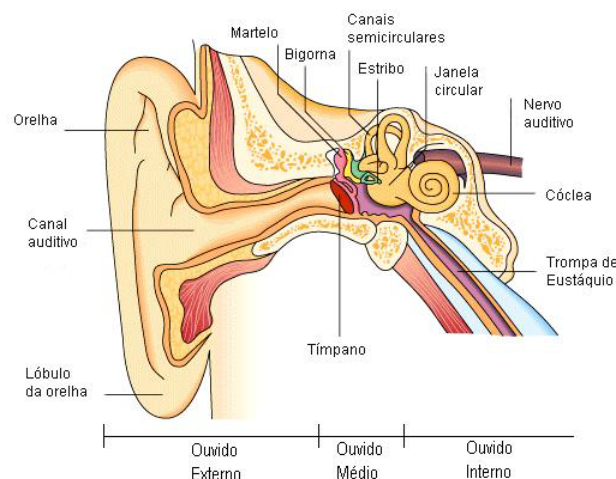


Figura 2.1 – Ouvido Humano. [W.5]

O ouvido externo é constituído pela parte externa do ouvido, o pavilhão auricular ou orelha, que recolhe e conduz as ondas sonoras pelo canal auditivo até ao tímpano. O pavilhão auricular tem a forma de uma concha acústica e funciona como um colector de ondas sonoras. O canal auditivo é constituído por um tubo rígido que direcciona as ondas mecânicas em direcção ao tímpano, que vibra em ressonância, tendo cerca de 2,5 cm de comprimento e 1,25 cm de largura.

O ouvido externo, ao captar os sons, transmite-os para uma área vibratória menor, fazendo com que o som seja amplificado, optimizando a pressão sonora incidente no tímpano, especialmente aquelas que correspondem à frequência verbal, entre os 2.500 e os 3.000 Hz.

No interior do canal auditivo a temperatura mantém-se sempre constante para que as propriedades físicas do som não sejam alteradas.

O ouvido médio está localizado na cavidade do osso temporal, denominada caixa do tímpano.

No interior do ouvido médio existe uma cadeia de três pequenos ossos ou ossículos. O mais externo, designado martelo, está encostado ao tímpano e articula-se a outro osso designado bigorna. A bigorna, por sua vez, articula-se ao estribo. A base do estribo repousa na janela circular do ouvido interno.

Estes três ossos funcionam como alavancas, aumentando cerca de vinte e duas vezes a força da vibração inicial recebida pelo tímpano. O estímulo sonoro após ampliado é conduzido até à membrana que envolve a janela circular.

No interior do ouvido médio, além dos três ossos, existe a trompa de Eustáquio. Esta trompa comunica com a garganta e tem como função estabelecer o equilíbrio de pressões entre ambos os lados do tímpano.

O ouvido interno consiste num sistema de tubos, ou passagens, escavados no osso temporal. Este é constituído pelos sistemas coclear e vestibular.

As ondas sonoras são transmitidas do tímpano ao fluído da cóclea pelos três ossículos.

A cóclea é o órgão sensorial que permite a descodificação dos sons e evoca o sentido de audição. Esta tem a forma de uma concha de caracol, sendo uma espiral de duas voltas e meia, cheia de linfa, um fluído semelhante ao sangue (diferente deste por não conter glóbulos vermelhos) e é revestida por uma membrana sensível constituída por 24.000 fibras.

Na cóclea, as cordas auditivas, denominadas por fibras basilares, aumentam de comprimento gradativamente da base para o cimo da cóclea. Quando elas vibram estimulam as células nervosas próximas para que estas enviem um impulso nervoso ao cérebro, onde este é interpretado.

O sistema vestibular é constituído pelos canais semicirculares, sáculo e utrículo e têm como função comunicar com o sistema nervoso central sobre a posição e movimentos da cabeça, ou seja, transmitir a sensação de equilíbrio. As bolsas, o sáculo e o utrículo, indicam a posição da cabeça e os canais indicam a direcção em que esta se move. Toda esta informação é transmitida ao cérebro através da conversão da diferença de pressões que o líquido, existente em toda esta estrutura, provoca nos pêlos sensoriais existentes nas bolsas para sinais eléctricos.

Resumidamente, pode-se dizer que as ondas sonoras são captadas pelo ouvido externo, ampliadas pelos ossículos no ouvido interno e processadas pela cóclea no ouvido interno [W.20] [W.5].

2.2.2. Som

O som é um fenómeno físico ondulatório periódico, que resulta da variação de pressão num meio elástico. Este existe sempre que o ouvido humano detecta uma diferença de pressão entre a pressão atmosférica e a pressão provocada pela vibração.

O som pode ser definido como uma forma de energia que se transmite ao longo de um determinado meio de propagação, compressível, pelo choque das moléculas constituintes desse meio umas contras as outras, originando variações na pressão existente, ou seja variações na velocidade das partículas. Este pode ter origem nos movimentos de um corpo vibrante, funcionamento de aparelhos emissores de som, como a televisão, rádio, “mp3”, o escoamento de gases, tudo o que origine perturbações na pressão atmosférica envolvente. Estas perturbações são constituídas por contracções e dilatações de volumes de ar.

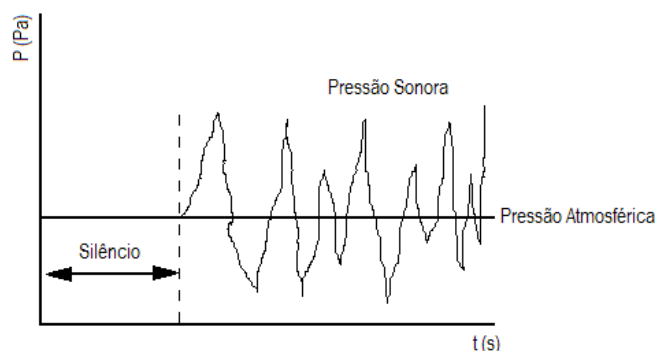


Figura 2.2 – Variação de pressão ao longo do tempo. [18]

Através da Figura 2.2 pode-se definir a grandeza de pressão sonora, $p(t)$, como sendo:

$$p(t) = P(t) - P_0 \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

onde:

- $P(t)$ – pressão total resultante, ou seja a soma da pressão atmosférica com a pressão devida às perturbações;
- P_0 – pressão atmosférica;

O som é uma onda mecânica, logo para se propagar necessita de um meio físico, contrariamente à luz que não necessita de nenhum meio para se propagar, uma vez que é uma onda electromagnética. O meio de propagação pode ser sólido, líquido ou gasoso.

O som, como se viu anteriormente, pode-se propagar em vários meios mas a sua velocidade de propagação varia com o meio onde ocorre essa propagação. Para elementos mais rígidos a velocidade de propagação é superior, quando comparado com a de elementos mais flexíveis, como se pode observar no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Velocidade de propagação do som em vários meios. [W.11]

Meio	Velocidade [m/s]
Ar	344
Água Doce	1460
Madeira	1000 a 4900
Cimento	4000
Aço	4700 a 5150
Vidro	5000 a 6000

A sensação auditiva captada pelo ser humano não inclui todas as flutuações de pressão, à semelhança da sensação luminosa. Esta só ocorre quando a amplitude das flutuações e a taxa de variação em que acontece ao longo do tempo, designada frequência, estiverem dentro de certos limites.

A gama de frequências auditivas captada pelo ser humano, novamente, à semelhança da visual, pode ser diferente da gama de frequências captada pelos restantes animais. Alguns animais conseguem captar frequências mais baixas, infra-sons, como exemplo tem-se os elefantes, e outros conseguem captar frequências mais elevadas, ultra-sons, como por exemplo os morcegos.

A faixa de frequências captadas pelo ser humano está entre os 20 e os 20.000 Hz. Ao longo desta faixa de frequências a sensibilidade ao som não se mantém constante. Além da sensibilidade ao som o ouvido também tem sensibilidade às vibrações. Este tem sensibilidade para se aperceber de pulsações com frequências entre os 15 e os 20 Hz, ou

seja, interpreta sons que vão desde os infra-sonoros até 100 Hz, não como som ou ruído mas sim como vibração.

A sensibilidade ao som, no ser humano, nas médias e altas frequências é maior que nas baixas frequências e é de tal ordem que uma variação de pressão na ordem dos 2×10^{-5} Pa pode ser detectada, desde que esta ocorra na faixa de frequências onde o ouvido humano tem maior sensibilidade, entre os 1.000 Hz e os 4.000Hz.

A faixa de frequências audíveis pelo ser humano encontra-se dividida em três zonas principais: frequências graves, médias e altas.

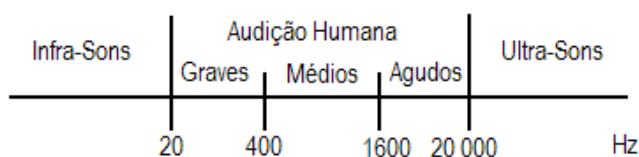


Figura 2.3 – Frequências audíveis.

Apesar da sensibilidade do ouvido humano variar com a frequência, esta também vai variar com a diferença de níveis de pressão sonora entre os vários sons existentes, ou seja em ambientes calmos consegue-se conversar com um nível de 65 dB sem que haja dificuldade na audição, contudo se mantivermos este nível de conversação e nos deslocarmos para o interior de um local com algum ruído de fundo, facilmente o ruído de fundo e o de conversação ficam ao mesmo nível obrigando-nos a aumentar o nível de pressão sonora de conversação para que sejamos ouvidos. Esta sensibilidade audível é apresentada na Figura 2.4.

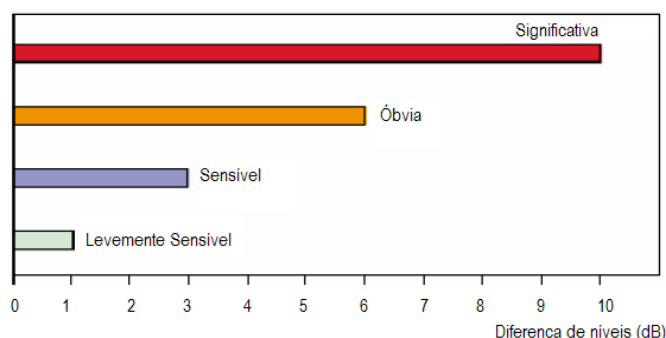


Figura 2.4 – Sensibilidade Auditiva. [11]

Além do referido anteriormente, pode-se dizer que o som ou sinais sonoros são constituídos por combinações de sons puros.

Na Figura 2.5 estão representados alguns sons produzidos por alguns instrumentos.



Figura 2.5 – Exemplos de sons produzidos por instrumentos musicais. [20]

O som puro é uma onda harmónica ou sinusoidal, a sua forma matemática é função do seno ou co-seno, ou seja só tem um comprimento de onda, uma única frequência.

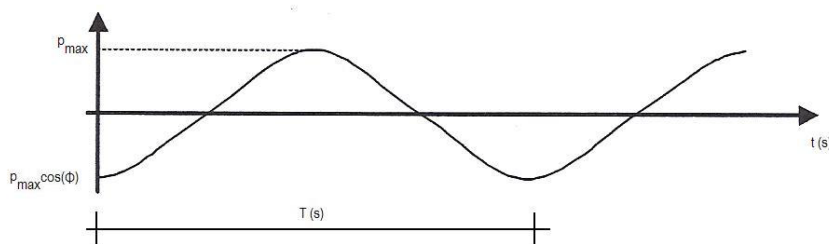


Figura 2.6 – Som puro. [20]

A função trigonométrica que define a onda da Figura 2.6 é:

$$p(t) = p_{\max} \times \cos(\omega t + \phi) \quad [\text{Pa}] \quad (2.2)$$

onde:

- ω - frequência ou velocidade angular (rad/s) , $\omega = 2\pi f$;
- ϕ - fase, define a pressão inicial;

O som puro pode ser gerado por osciladores de um grau de liberdade, como, por exemplo, um diapasão que, embora não reproduza um som totalmente puro, reproduz um som real que mais se aproxima do puro. Um som 100% puro apenas pode ser gerado electronicamente.



Figura 2.7 – Diapasão. [W.15]

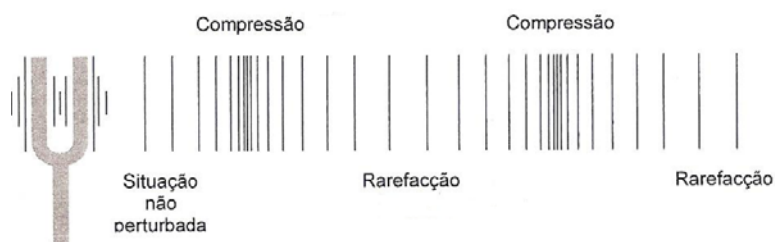


Figura 2.8 – Diferenças de pressão provocadas pelo diapasão. [20]

Durante a propagação do som ao longo do meio, considerando para este caso o ar, as moléculas de ar vão sofrer uma agitação, agitação essa que irá provocar em certas zonas um aumento do número de partículas de ar, compressão, e consequente aumento de pressão e noutras zonas uma diminuição do número de partículas, rarefacção, e consequente diminuição de pressão. Esta situação está exemplificada na Figura 2.9.

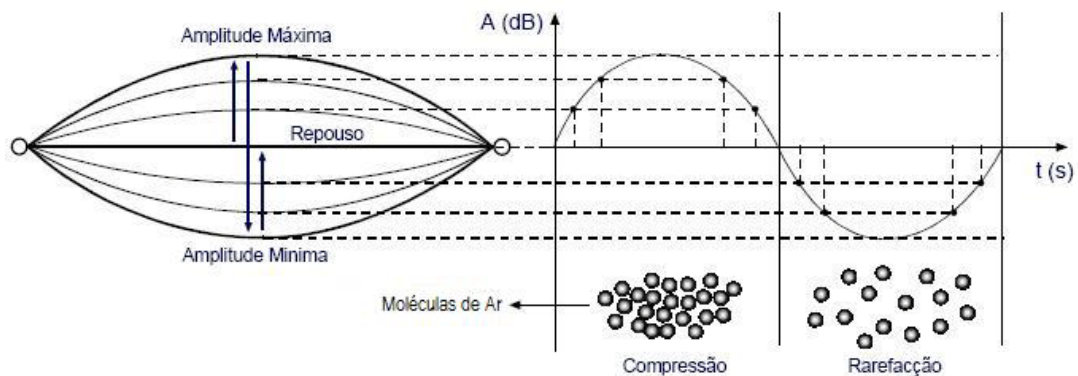


Figura 2.9 – Comportamento das moléculas de ar. [W.16]

Na Figura 2.10 é apresentado um exemplo de propagação da onda sonora ao longo do tempo, mais especificamente em 13 instantes de tempo diferentes e será avaliada a movimentação de 13 partículas diferentes.

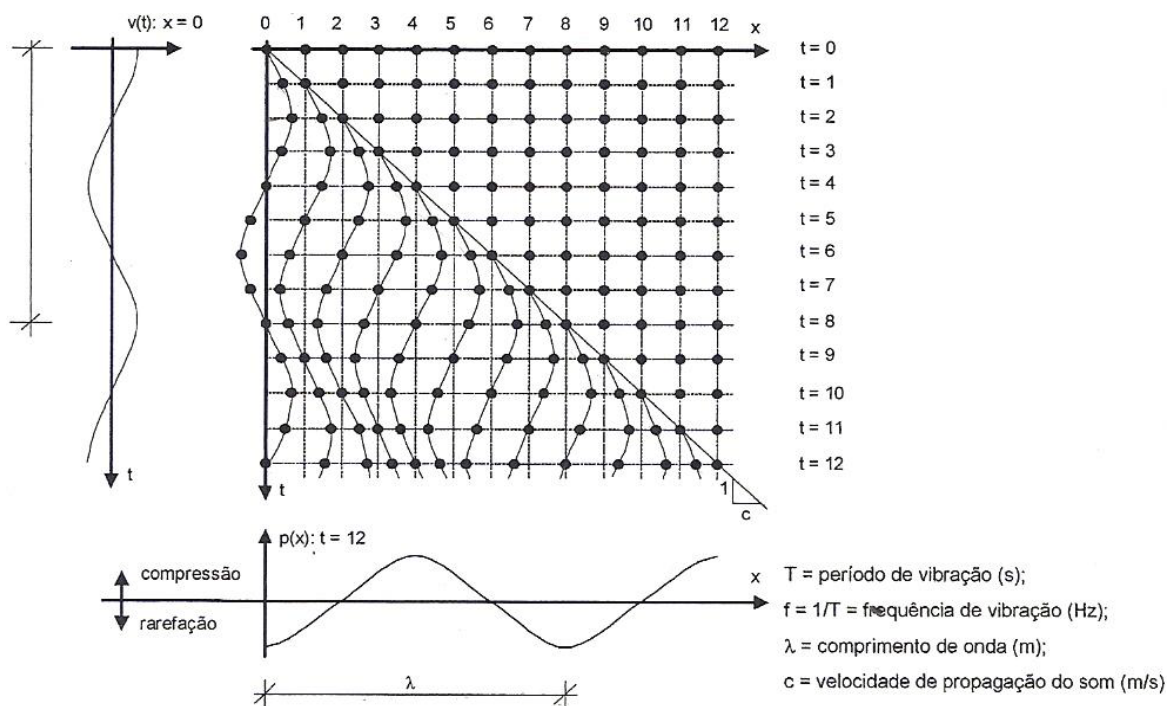


Figura 2.10 – Propagação de uma onda sonora ao longo do tempo. [20]

Através da visualização da figura anterior pode-se concluir que:

- a partícula $x=0$ tem deslocamento máximo para $t=2$, $t=6$ e $t=10$, portanto nesses pontos a velocidade irá ser igual a zero;
- que cada partícula irá ter a mesma fase na mesma posição;
- que a agitação nas partículas irá provocar um movimento ondulatório mas partículas e consequentemente compressões e rarefações;

A reacção do ouvido humano varia com a duração dos sinais sonoros. Os sinais sonoros de curta duração podem não ser perceptíveis pelo ouvido humano, como o ouvido não os consegue interpretar, não se apercebe da sua presença e não activa os seus sistemas de defesa, que aumenta o limiar de audibilidade, deste modo, são provocadas lesões auditivas permanentes em vez de uma perda auditiva temporária, como acontece quando saímos de locais muito ruidosos como a discoteca. Os sinais sonoros de longa duração são interpretados pelo ouvido humano quase com a intensidade igual à intensidade real.

Na figura seguinte é exemplificada a interpretação que o ouvido humano faz destes dois tipos de sinais.

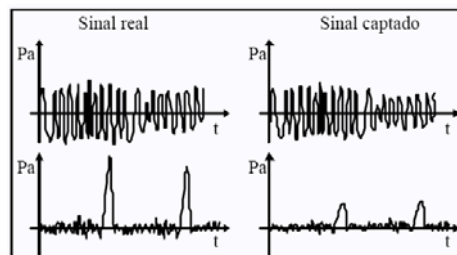


Figura 2.11 – Sinal real e sinal captado. [11]

2.2.3. Comprimento de Onda e Frequência

As ondas sonoras têm um determinado comprimento de onda que corresponde à distância mínima em que um padrão da onda, um ciclo ou oscilação, se repete. O intervalo mínimo de tempo em que ocorre este padrão de onda designa-se por período. Pode-se então afirmar que, a frequência está relacionada com a dimensão do ciclo que se forma no espaço e que o período está relacionado com o tempo que leva a formar esse ciclo.

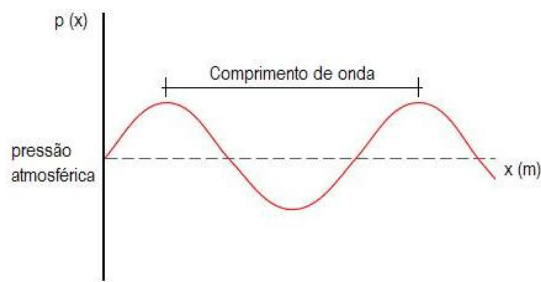


Figura 2.12 – Pressão ao longo de um comprimento. [9]

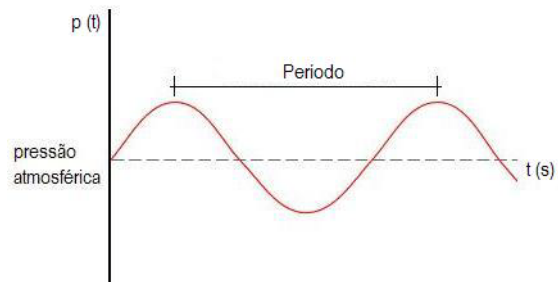


Figura 2.13 – Pressão ao longo do tempo. [9]

O comprimento de onda pode ser calculado através da expressão:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (2.3)$$

onde:

- c – velocidade do som no ar a 20 °C (68 °F), que é igual a, aproximadamente, 340 m/s;
- f – frequência;

A frequência define-se como o inverso do período, logo é igual a:

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2.4)$$

Donde se conclui que um som com uma frequência de 100 Hz e outro com 10.000 Hz têm um comprimento de onda respectivamente de:

$$\lambda_{100 \text{ Hz}} = \frac{340}{100} = 3,4 \text{ m}$$

$$\lambda_{10.000 \text{ Hz}} = \frac{340}{10000} = 0,034 \text{ m} = 3,4 \text{ cm}$$

Como o comprimento de onda do som de 100 Hz é de 3,4m e o do som de 10.000 Hz é de 0,034m pode-se concluir que o segundo, 10.000 Hz, precisa de mais ciclos que o primeiro, 100 Hz, para percorrer a mesma distância o que vai provocar uma maior dissipação de energia devido à maior resistência que este tem de vencer para chegar onde o outro som chega. Com isto conclui-se que sons mais graves (menor frequência) são audíveis a maiores distâncias que os sons mais agudos (maior frequência).

Através do Quadro 2.2 pode-se concluir isso mesmo, que para frequências baixas, sons graves, a atenuação do som é muito inferior às altas frequências. Como exemplo tem-se o som proveniente das discotecas cujas altas e médias frequências a longas distâncias não se ouvem ou mal se ouvem e as baixas frequências ouvem-se claramente. Por isto é que o apito dos navios é bastante grave, para que seja audível a grandes distâncias.

Quadro 2.2 – Atenuação sonora por km. [11]

Atenuação por km	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000Hz
	0,4 dB	1,3 dB	2,7 dB	4,7 dB	9,9 dB	30 dB

Como é lógico, a atenuação vai depender da distância, sendo inferior a curtas distâncias e superior a longas distâncias. A título indicativo, mostra-se no Quadro 2.3 onde se pode ver a atenuação no nível de pressão sonora provocada pelo ar.

Quadro 2.3 – Atenuação sonora por metro. [11]

Distância (m)	Atenuação [dB(A)]
100	1
500	3,2
1000	5,0

2.2.4. Pressão Sonora

O ouvido humano consegue ter percepção de sons que estejam na gama de frequência entre os 20 e os 20.000 Hz. Para um som com a frequência de 1.000 Hz a intensidade sonora que causa dor é cerca de 10^{12} vezes superior à que permite a percepção sonora do ouvido humano.

Como se pode perceber pelo exemplo anterior, o intervalo de valores, neste caso para a intensidade sonora, é bastante grande tornando quase impossível a sua representação numa escala linear. Devido à dificuldade de representação destes intervalos numa escala linear, optou-se por representá-los numa escala logarítmica porque além de permitir a redução do intervalo, o ouvido humano responde, também, segundo uma escala logarítmica.

O nível da pressão sonora (L_p) pode ser obtido pela expressão:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p_{ef}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p_{ef}}{p_{ref}} \right) \quad [dB] \quad (2.5)$$

onde:

- p_{ef} – valor eficaz da pressão sonora para um determinado intervalo de tempo, dado pela expressão:

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [p(t)]^2 dt \quad (2.6)$$

Para o ouvido humano o valor do intervalo de tempo de registo e processamento do cérebro está entre os 0,05 segundos e os 0,30 segundos, para sonómetros de integração rápida está entre os 0,125 e os 0,25 segundos e para sonómetros de integração lenta entre um e dois segundos;

- p_{ref} – pressão de referência, igual a 2×10^{-5} Pa (limiar de audibilidade);

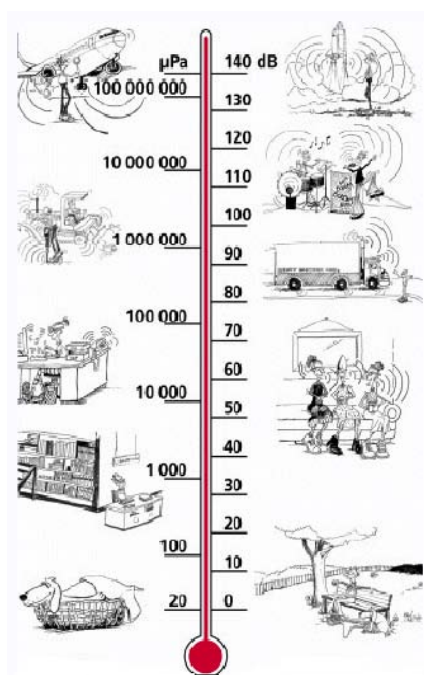


Figura 2.14 – Resposta do ouvido humano (nível de pressão sonora) em função da pressão sonora eficaz. [11]

O nível de pressão sonora é dado em decibéis, por ser um nível que caracteriza a relação entre duas grandezas, neste caso, de pressão.

Embora se tenha referido a pressão sonora provocada por uma fonte apenas, muitas vezes quando se efectuam medições, existe mais que uma fonte emissora. Neste caso, tem-se uma mistura de sons provenientes de várias fontes que provocam no seu conjunto um som cujo nível não é igual ao resultado da soma do nível do som emitido pelas diversas fontes, uma vez que a escala utilizada não é a linear mas sim a logarítmica, nem é, normalmente, igual ao valor do maior nível sonoro.

Tendo em consideração o que foi mencionado anteriormente, o nível sonoro proveniente da soma de n fontes é igual a:

$$L_t = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_i}{10}\right)} \right) \text{ [dB]} \quad (2.7)$$

Exemplificativamente, supondo que temos uma fonte a emitir 74 dB e outra fonte a emitir 75 dB o nível sonoro total é igual a:

$$L_t = 10 \log \left(10^{\left(\frac{74}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{75}{10}\right)} \right) = 77,54 \text{ dB}$$

Donde se pode concluir que níveis sonoros semelhantes vão fazer aumentar o nível de pressão sonora do local.

De forma simplista, em vez de se recorrer à expressão, pode-se recorrer à Figura 2.15 para determinar o nível de pressão sonora resultante da emissão sonora de duas fontes.

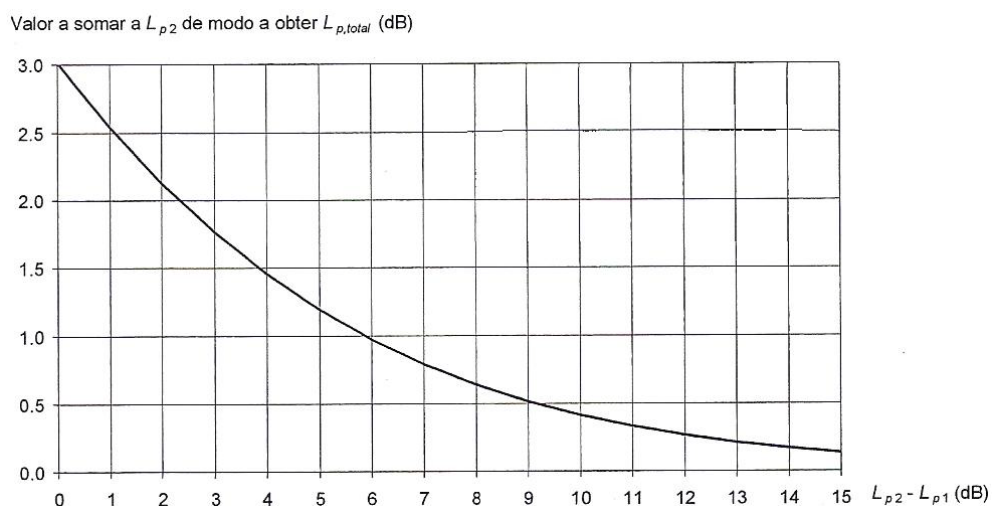


Figura 2.15 – Acréscimo de pressão sonora devido à emissão sonora de duas fontes. [20]

Através desta Figura 2.15 retira-se o valor a somar ao maior dos níveis (neste caso L_{p2}) de modo a obter o $L_{p, total}$.

Por exemplo se tivermos duas fontes, num mesmo local, a emitir 50 e a outra 59 dB, a pressão total existente nesse local será igual aos 59 dB mais 0,5 dB, que são retirados da figura, que irá dar 59,5 dB de pressão sonora registada no local.

Pela visualização desta figura pode-se concluir ainda que, numa diferença entre níveis sonoros superiores a 10 dB, o valor a somar é inferior a 0,5 dB. Assim, o som que emite o nível de pressão sonora inferior pode ser desprezado, ou seja pode-se considerar que não

existe, uma vez que não vai afectar o nível de pressão global do local. No caso da emissão de dois sons com o mesmo nível sonoro, o aumento do nível sonoro global é de 3 dB.

Ter a noção deste facto pode ser muito importante quer na soma de dois sons quer na subtracção. Ou seja se tivermos quatro máquinas a trabalhar em conjunto que produzam globalmente 80 dB e haja a suspeição de que uma delas está a avariada. Após desligar-se a máquina supostamente avariada repara-se que o nível passou para 77 dB. Com isto pode-se concluir que esta máquina sozinha conseguia produzir tanto ruído como a soma das outras três máquinas, que produziam cada uma 72 dB. Neste caso, desligando apenas uma máquina foi possível fazer a avaliação do problema sem que fosse necessário parar completamente as actividades dependentes delas.

2.2.5. Potência Sonora

A potência sonora representa a energia sonora emitida por uma fonte ou equipamento por unidade de tempo (J/s), sendo a sua unidade de medida o Watt.

A potência sonora, contrariamente à pressão e à intensidade sonora, é independente da localização da fonte emissora, das condições ambientais e da distância ao ponto de medição, ou seja apenas é dependente das características da própria fonte.

Através da seguinte expressão é possível calcular o nível de potência sonora:

$$L_W = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (2.8)$$

onde:

- W – valor da potência sonora da fonte emissora;
- W_{ref} – valor de referência, limiar de audibilidade do ouvido humano, que é igual a 10^{-12} Watts;

2.2.6. Intensidade Sonora

A intensidade sonora representa a quantidade de energia que é transmitida numa determinada direcção por unidade de área de campo sonoro. Esta é dada pela seguinte expressão:

$$I = \frac{W}{A} \quad (2.9)$$

onde:

- W – potência, Watts;
- A – área do campo sonoro, m²;

A intensidade sonora irá aumentar com a amplitude da onda porque o aumento da amplitude irá provocar um aumento da pressão do ar que por sua vez irá fazer aumentar a intensidade. Além da amplitude da onda, a intensidade sonora também depende da distância à fonte. Por exemplo para uma radiação esférica, se se aumentar a distância para o dobro da distância inicial, a área quadruplica e a intensidade sonora diminui 25%, como pode ser comprovado pelas expressões seguintes:

$$\text{Área da esfera inicial} = 4 \times \pi \times r^2$$

$$\text{Área da esfera para o dobro da distância} = 4 \times \pi \times (2 \times r)^2 = 4 \times (4 \times \pi \times r^2)$$

$$\text{Intensidade inicial} = \frac{W}{4 \times \pi \times r^2}$$

$$\text{Intensidade para o dobro da distancia} = \frac{W}{4 \times \pi \times (2 \times r)^2} = I_{\text{inicial}} \times \frac{1}{4}$$

O nível de intensidade sonora corresponde à média de energia sonora transmitida por unidade de tempo por unidade de superfície, que é dada pela seguinte expressão:

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (2.10)$$

onde:

- I – intensidade sonora medida;
- I_{ref} – intensidade sonora de referência, para uma radiação esférica sem obstáculos e com uma temperatura do ar é igual a 15 °C, 10⁻¹² Watt/m²;

2.2.7. Tipos de Fontes de Som Aéreo

As fontes emissoras de som ou ruído, normalmente, podem ser de três tipos: pontual, linear ou plana.

○ Fonte pontual – a fonte pontual representa uma fonte que emite som em todas as direcções, ou seja omnidireccional. Como exemplo tem-se o avião.

A diminuição de intensidade sonora com a distância à fonte é igual a 6 dB/2r porque supondo que se tem inicialmente uma distância r da fonte, como a fonte é pontual a área de

igual intensidade será igual a $A_r = 4 \times \pi \times r^2$ mas se duplicarmos a distância esta será igual a $A_{2r} = 4 \times \pi \times (2r)^2$ e sabendo que a cada área irá corresponder a uma pressão sonora, tem-se para a duplicação da distância:

$$\left. \begin{array}{l} A_r = 4 \times \pi \times r^2 \rightarrow p_r \\ A_{2r} = 4 \times \pi \times (2r)^2 \rightarrow p_{2r} \end{array} \right\} p_{2r} = \frac{A_{2r}}{A_r} \times p_r = \frac{1}{4} \times p_r$$

passando a pressão sonora para o nível de pressão sonora, ou seja passando para uma escala logarítmica tem-se:

$$p_{2r} = \frac{p_r}{4} \Rightarrow L_{p,2r} = L_{p,r} - 10 \times \log(4) \Rightarrow L_{p,2r} = L_{p,r} - 6 \text{ [dB]} \quad (2.11)$$

○ Fonte linear – a fonte linear representa uma fonte cujos níveis de pressão sonora são constantes ao longo de um plano cilíndrico paralelo à fonte emissora. Como exemplo tem-se o tipo de som emitido pela circulação automóvel intensiva numa via, onde os níveis de pressão sonora diminuem com a distância à fonte, ou seja paralelamente ao sentido do tráfego.

Sabendo que a área de um cilindro é igual a: $A_r = 2 \times r \times \pi \times C$

Com um raciocínio análogo à fonte pontual, obtém-se:

$$\left. \begin{array}{l} A_r = 2 \times r \times \pi \times C \rightarrow p_r \\ A_{2r} = 2 \times (2r) \times \pi \times C \rightarrow p_{2r} \end{array} \right\} p_{2r} = \frac{A_{2r}}{A_r} \times p_r = \frac{1}{2} \times p_r$$

$$p_{2r} = \frac{p_r}{2} \Rightarrow L_{p,2r} = L_{p,r} - 10 \times \log(2) \Rightarrow L_{p,2r} = L_{p,r} - 3 \text{ [dB]} \quad (2.12)$$

ou seja, para este caso ocorre uma redução de 3 dB por duplicação da distância.

○ Fonte plana – a fonte plana representa o som cujos níveis de pressão sonora se vão distribuir através de semi-esferas. Este é o caso mais usual de fonte uma vez que quase todos os sons emitidos na superfície são condicionados por esta provocando uma dispersão do som em forma de semi-esfera em vez da esfera.

Como facilmente se consegue verificar pela interpretação da redução da fonte pontual, neste caso a redução também irá ser de 6 dB por duplicação da distância.

2.2.8. Banda de Frequências

O ouvido humano tem capacidade para detectar sons dos 20 aos 20.000 Hz, o que se traduz numa escala enorme de frequências.

Com o objectivo de permitir a análise de todas as frequências sonoras audíveis pelo ser humano sem que se tenha uma escala quase infindável, optou-se por compactar ou concentrar mais a escala de frequências, dando origem à banda de frequências.

As bandas de frequências têm larguras pré-definidas e normalizadas, sendo as mais utilizadas em acústica as que têm a largura de uma oitava (1), um terço de oitava ($1/3$), um dozeavos de oitava ($1/12$) e um vinte e quatro avos de oitava ($1/24$).

As larguras de banda de um terço de oitava são impostas em ensaios realizados em laboratório e as de uma oitava podem ser utilizadas em avaliações efectuadas *in situ*.

Quando são efectuadas análises mais detalhadas, que requerem maior rigor, normalmente ensaios experimentais efectuados em condições padronizadas, ou seja em laboratório, são utilizados, ou podem ser utilizados, bandas de frequência de $1/12$ oitava ou $1/24$ oitava.

Uma oitava pode ser definida como sendo um intervalo entre uma nota musical e outra nota que tenha o dobro ou metade da sua frequência.

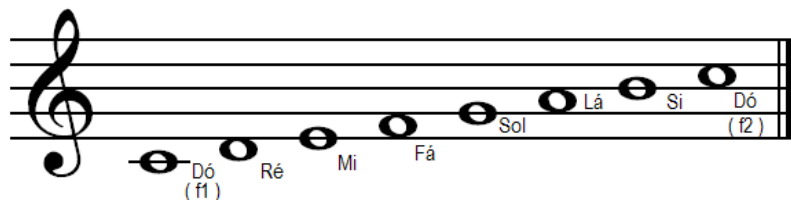


Figura 2.16 – Escala musical. [W.23]

Na Figura 2.16 é representado um exemplo de uma oitava, onde $f_2/f_1=2$, uma vez que a frequência do Dó(f_2) é o dobro do Dó(f_1).

Se em vez de uma oitava se quisesse $1/3$ de oitava, a relação entre as frequências teria de ser igual a $f_2/f_1=2^{1/3}$, para $1/12$ de oitava, $f_2/f_1=2^{1/12}$ e para $1/24$ de oitava, $f_2/f_1=2^{1/24}$.

No Quadro 2.4 estão colocados os valores das frequências centrais e respectivos limites mais comuns na utilização na acústica de edifícios.

Quadro 2.4 – Bandas de Frequência.

Frequência Central (Hz)	Banda de Terços de Oitava (Hz)	Bandas de Oitava (Hz)
63	56,2 – 70,8	44,7 – 89,1
80	70,8 – 89,1	
100	89,1 – 112	
125	112 – 141	89,1 – 178
160	141 – 178	
200	178 – 224	
250	224 – 282	178 – 355
315	282 – 355	
400	355 – 447	
500	447 – 562	355 – 708
630	562 – 708	
800	708 – 891	
1000	891 – 1120	708 – 1410
1250	1120 – 1410	
1600	1410 – 1780	
2000	1780 – 2240	1410 – 2820
2500	2240 – 2820	
3150	2820 – 3550	
4000	3550 – 4470	2820 – 5620
5000	4470 – 5620	
6300	5620 – 7080	
8000	7080 – 8910	5620 – 11200

Para melhor compreensão do conceito de banda de frequência a Figura 2.17 ilustra as bandas de oitava e 1/3 de oitava.

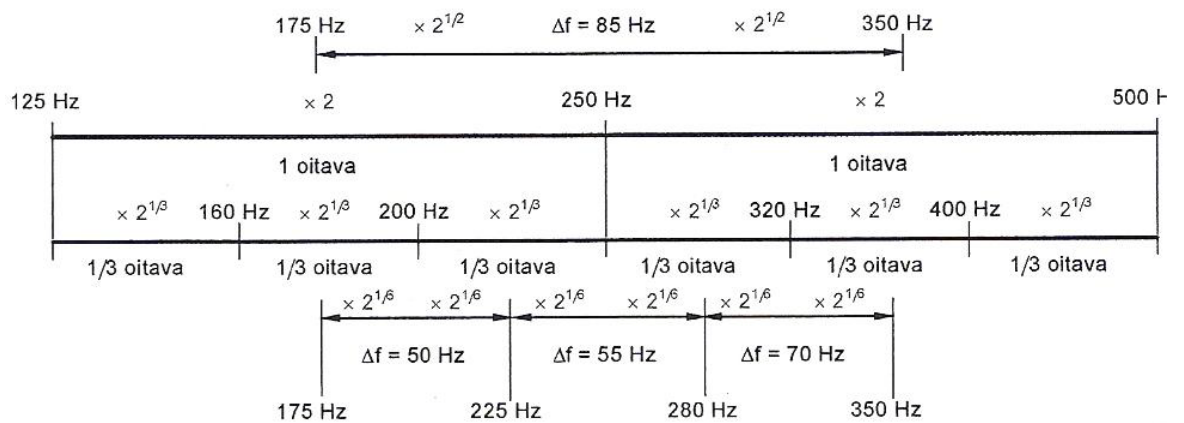


Figura 2.17 – Representação das bandas de frequência. [20]

2.2.9. Curvas Isofônicas

As curvas isofônicas representam a sensação auditiva provocada por um som no ouvido humano. Esta sensação é função da frequência e do nível de pressão sonora que esse som produz. Todos os sons cuja sensação auditiva provocada seja igual são unidos com uma linha, dando origem às curvas isofônicas, ou seja às curvas de igual sensação auditiva.

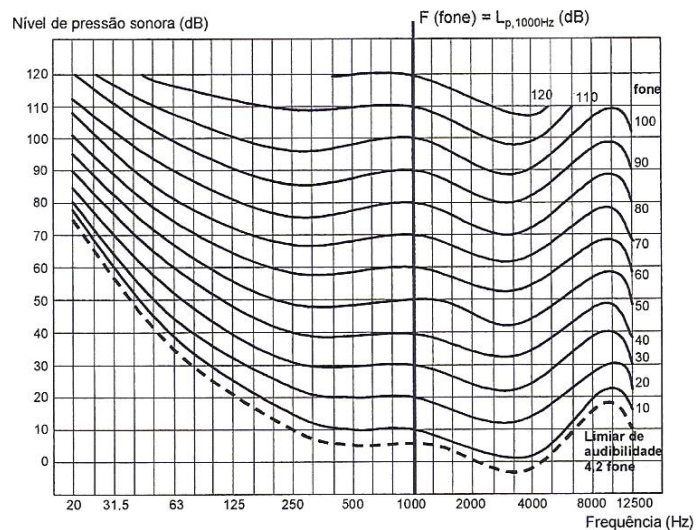


Figura 2.18 – Curva isofônica. [20]

Como exemplo, pode-se verificar, na figura anterior, que um som com um nível de pressão sonora de 40 dB e uma frequência de 1.000 Hz provoca uma sensação de 40 fone e que um som com um nível de pressão de 60 dB e uma frequência de 63 Hz provoca, igualmente, uma sensação de 40 fone.

A unidade fone representa todas as sensações auditivas iguais às provocadas por um som cuja frequência é fixada em 1.000 Hz e cujo nível de pressão sonora varia, sendo o

valor do nível de pressão sonora, em decibéis, de cada som que irá definir a unidade fone, ou seja um som cujo frequência é de 1.000 Hz e o nível de pressão sonora é de 10 dB corresponde a um som de 10 fone.

Exemplificadamente, apresenta-se uma figura, Figura 2.19, com gamas de frequências e níveis sonoros de alguns sons audíveis pelo ouvido humano.

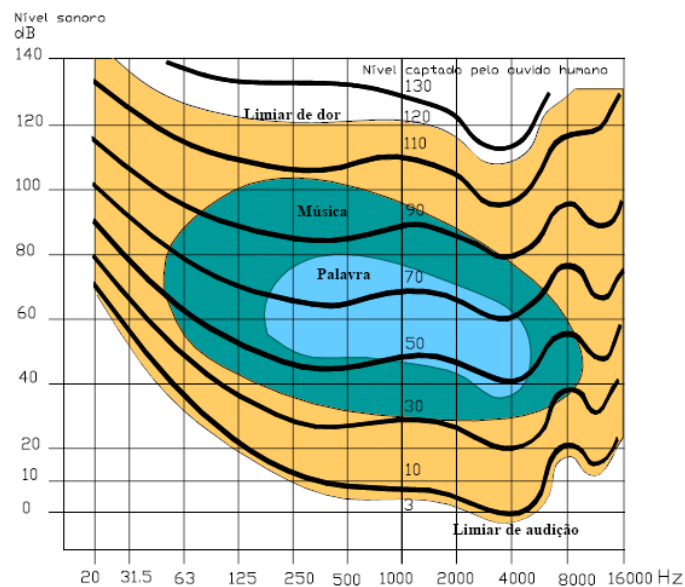


Figura 2.19 – Curva isofônica. [11]

2.2.10. Ponderação

As curvas de ponderação, ou compensação, permitem transformar os valores obtidos para um determinado som, por um sonómetro, para valores que refletem a resposta que teria o ouvido humano.

As curvas de compensação existentes são: A, B, C e D.

As curvas A, B e C correspondem ao inverso das curvas de 40, 70 e 100 fone, respectivamente, ou seja corresponde aproximadamente à diferença entre o valor da curva de referência (40, 70 ou 100 fones) e o nível de pressão sonora para uma frequência fixa. Por exemplo, supondo que se tem um som com 72 dB a uma frequência de 63 Hz:

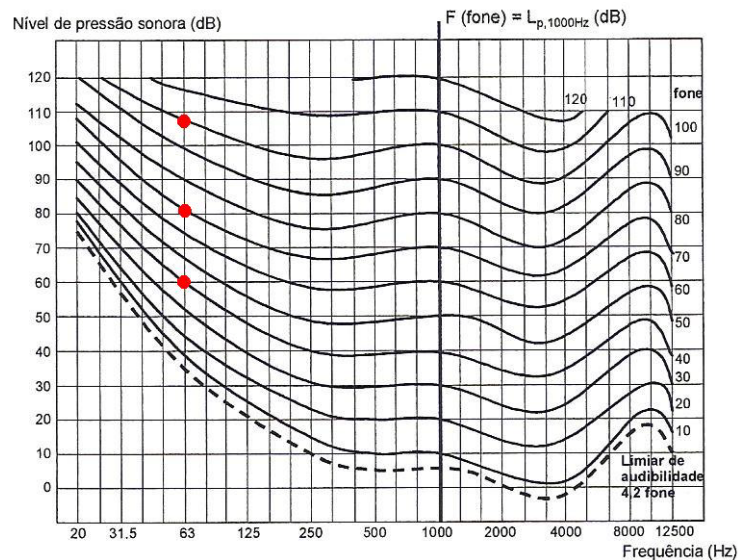


Figura 2.20 – Curva isofônica.

Pela visualização da figura anterior pode-se concluir que um som com 63 Hz para a curva A corresponde a 60dB, para a curva B a 82dB e para a curva C a 109dB.

Logo, para cada curva tem-se o correspondente nível sonoro corrigido:

- Para a curva A (40 fone)

$$\text{Ponderação} = 40 - 60 = -20 \text{ dB}$$

$$\text{Nível pressão sonora} = 72 - 20 = 52 \text{ dB(A)}$$

- Para a curva B (70 fone)

$$\text{Ponderação} = 70 - 82 = -12 \text{ dB}$$

$$\text{Nível pressão sonora} = 72 - 12 = 60 \text{ dB(B)}$$

- Para a curva C (100 fone)

$$\text{Ponderação} = 100 - 109 = -9 \text{ dB}$$

$$\text{Nível pressão sonora} = 72 - 9 = 63 \text{ dB(C)}$$

A curva A é a mais semelhante à percepção do ouvido humano, por isso é a que normalmente é utilizada para a ponderação sonora. Esta tem um ajuste mais eficaz na gama de frequências audíveis pelo ser humano, ou seja nas médias e altas frequências.

A curva B e C são utilizadas para ruídos de intensidade média e forte, respectivamente, ou seja sons mais graves.

A curva D é utilizada para o ruído provocado por aeronaves.

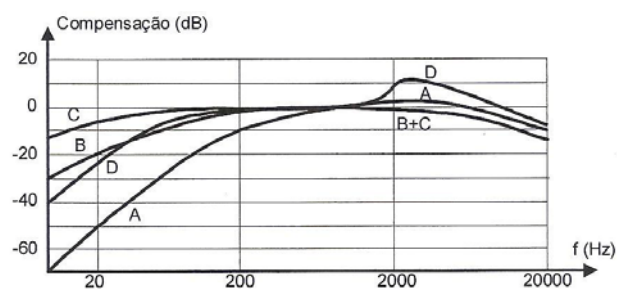


Figura 2.21 – Curva de ponderações. [20]

Para uma leitura mais fácil, apresenta-se no Quadro 2.5 os valores de compensação para cada curva.

Quadro 2.5 – Ponderações.

Frequência (HZ)	Ponderação			
	A	B	C	D
20	-50,39	-24,16	-6,22	-20,60
25	-44,82	-20,48	-4,44	-18,70
31,5	-39,52	-17,12	-3,03	-16,70
40	-35,54	-14,10	-1,98	-14,70
50	-30,27	-11,62	-1,30	-12,80
63	-26,22	-9,36	-0,82	-10,90
80	-22,40	-7,31	-0,50	-9,00
100	-19,14	-5,65	-0,30	-7,20
125	-16,19	-4,23	-0,17	-5,50
160	-13,24	-2,94	-0,08	-4,00
200	-10,85	-2,04	-0,03	-2,60
250	-8,67	-1,36	0,00	-1,60
315	-6,64	-0,85	0,02	-0,80
400	-4,77	-0,50	0,03	-0,40
500	-3,25	-0,28	0,03	-0,30
630	-1,91	-0,13	0,03	-0,50
800	-0,79	-0,04	0,02	-0,60
1000	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,58	0,01	-0,03	2,00
1600	0,99	-0,02	-0,09	4,90
2000	1,20	-0,09	-0,17	7,90
2500	1,27	-0,21	-0,30	10,40
3150	1,20	-0,40	-0,50	11,60

Frequência (HZ)	Ponderação			
	A	B	C	D
4000	0,96	-0,73	-0,83	11,10
5000	0,55	-1,18	-1,29	9,60
6300	-0,12	-1,89	-1,99	7,60
8000	-1,15	-2,94	-3,05	5,50
10000	-2,49	-4,30	-4,41	3,40
12500	-4,25	-6,07	-6,18	1,40
16000	-6,71	-8,53	-8,63	-0,70
20000	-9,35	-11,17	-11,28	-2,70

Como a ponderação mais comumente utilizada e necessária é a da curva A, apresenta-se de seguida a expressão a partir da qual se consegue obter o valor do nível de pressão sonora ponderado.

$$L_{p,A} = 10 \log \left(\sum_i 10^{\frac{L_{p,i} + \text{Compensação A}}{10}} \right) \text{ [dB(A)]} \quad (2.13)$$

Para as restantes ponderações a expressão a utilizar é semelhante, diferindo apenas no valor da compensação que é utilizado, tanto pode ser o B, C ou D, e no resultado final, em vez de vir em dB(A) pode vir em dB(B), dB(C) ou dB(D), respectivamente.

2.2.11. Condições Atmosféricas

Em campo aberto a dissipação da energia sonora é influenciada pela acção do vento e da variação da temperatura, permitindo a existência de zonas onde ocorre uma maior concentração de energia sonora – reforço, e outras zonas onde existe um défice de energia sonora – zona de sombra.

Para o caso do vento tem-se o exemplo da Figura 2.22.

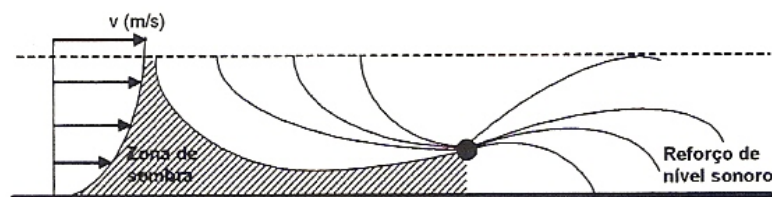


Figura 2.22 – Influência do vento nas ondas sonoras. [20]

A partir da visualização da Figura 2.22 pode-se concluir que devido ao vento, neste caso, soprar da esquerda para a direita vai haver um arrastamento das ondas sonoras da esquerda para a direita o que vai provocar uma zona de sombra na zona da esquerda e um reforço do nível sonoro no lado direito devido às ondas que se deslocaram da esquerda para a direita.

Para o caso da temperatura existem dois tipos, o do gradiente normal e o da inversão simples.

O primeiro caso corresponde à ascensão das ondas sonoras devido à zona do solo apresentar uma temperatura superior à registada em altitude fazendo com que o ar se desloque de baixo para cima, arrastando com ele as ondas sonoras e consequentemente provocando uma zona de sombra acústica, junto à superfície, e um pequeno reforço na zona sobre a fonte emissora. Esta situação corresponde normalmente ao período diurno.

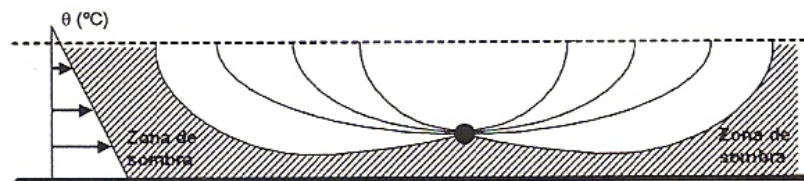


Figura 2.23 – Influência da temperatura nas ondas sonoras. [20]

O segundo caso representa o período do dia em que a temperatura do solo está inferior à temperatura existente a alguns metros acima da superfície. Nesta caso, o ar tende a descer e com ele arrasta parte das ondas sonoras até à superfície e outra parte tende a subir, conforme é exemplificado na Figura 2.24. Esta situação corresponde normalmente ao período do final da noite, quando o solo já arrefeceu bastante. Por isso é que nesta altura do dia é mais facilmente perceptível o passar dos aviões que no caso anterior.

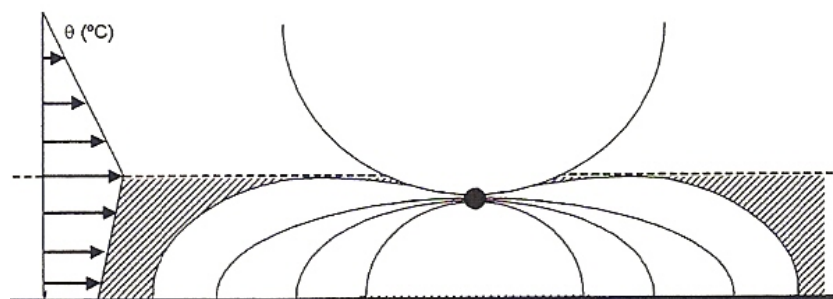


Figura 2.24 – Influência da temperatura nas ondas sonoras. [20]

2.2.12. Ruído

Diferentes tipos de sons podem produzir sensações auditivas distintas. Estas sensações dependem não só do tipo de som emitido mas também da recepção porque o que é ruído para umas pessoas para outras pode ser considerado um som. Por exemplo, para pessoas que gostam de ouvir rock o som produzido é agradável e por isso pode ser designado como som mas para pessoas que detestam rock o som emitido não passa de barulho por isso pode ser designado como ruído.

Resumidamente, o ruído pode ser considerado como um som indesejável que provoca uma sensação desagradável ou incomodativa podendo ser considerado, em certos casos, como perigoso por provocar lesões auditivas ou mesmo levar à surdez das pessoas que a ele estejam expostas.

A níveis baixos, quando o ruído é apenas incomodativo, este pode provocar dificuldades em manter a atenção, a concentração, a comunicação, o descanso e o repouso. A longo prazo, para exposições contínuas, existirão implicações na saúde das pessoas que a ele estejam expostas, podendo ocasionar estados crónicos de nervosismos e stress que por sua vez resultam em doenças mais graves como as doenças cardiovasculares e alterações do sistema imunitário. Como consequência tem-se a falta de rendimento no trabalho/escola, os acidentes de trabalho, o abandono das cidades, entre outras [14].

Quando a intensidade do som é bastante elevada este é considerado como ruído, não dependendo da sua eventual agradabilidade, devido à gravidade das consequências futuras para as pessoas que estejam expostas a este tipo de som. A consequência última, desta exposição é a surdez. Esta pode ser de dois tipos:

- Surdez permanente, que provoca lesões auditivas e que pode ter origem em três tipos de exposição. Quando existe uma exposição prolongada a níveis sonoros superiores a 75 dB(A) ou quando existe uma exposição a sons de curta duração com níveis superiores a 110 dB(A) ou, por fim, quando existe uma acumulação da fadiga auditiva sem que haja tempo suficiente de recuperação.
- Surdez transitória ou fadiga auditiva, que não provoca lesões auditivas, onde a recuperação auditiva é quase total ao fim de 2 horas num ambiente acústico confortável e total ao fim de 16 horas.

Como exemplo meramente indicativo tem-se de seguida o Quadro 2.6 onde são apresentados alguns valores em decibéis a partir dos quais se sente os efeitos nocivos indicados e posteriormente é transcrito um exemplo de interferência do ruído na comunicação [W.4].

Quadro 2.6 – Efeitos nocivos por níveis sonoros. [W.4]

dB	Efeito Nocivo
30	Dificuldade em conciliar o sono Perda de qualidade do sono
40	Dificuldade na comunicação
45	Provável interrupção do sono
50	Incómodo diurno moderado
55	Incómodo diurno forte
65	Comunicação verbal extremamente difícil
75	Perda de audição a longo prazo
110-140	Perda de audição a curto prazo

Exemplo na Interferência do ruído na comunicação [W.4]:

«O nível de som de uma conversação em tom normal, a 1 metro da outra pessoa, varia entre os 50 e 55 dB(A), falando aos gritos pode-se chegar a valores de 75 ou 80 dB(A). Por outro lado, para que a palavra seja perfeitamente audível é necessário que a sua intensidade supere em 15 dB(A) o ruído de fundo. Portanto um ruído de fundo superior a 35 ou 40 dB(A) provocará dificuldades na comunicação oral, que só se pode resolver, parcialmente, aumentando o tom de voz. A partir dos 65 dB(A) de ruído, a conversa se torna extremamente difícil.»

Para a contabilização do nível de ruído recorre-se à fórmula do nível de ruído equivalente que fornece o nível de ruído médio medido ao longo de um determinado tempo ou de uma determinada frequência sendo desprezável o nível de ruído abaixo dos 50 Hz e acima dos 8000 Hz.

A expressão do nível de ruído equivalente é igual a:

- Para medições ao longo do tempo

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_i \Delta t \times 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \text{ [dB]} \quad (2.14)$$

onde:

- T – número de medições em frequência ou ao longo do tempo;

- Para medições em frequência

$$L_{eq} = 10 \log \left(\sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \text{ [dB]} \quad (2.15)$$

Para ser mais perceptível seguem-se dois exemplos, um para o nível médio medido ao longo do tempo e outro do nível médio em frequência.

- Nível médio medido ao longo do tempo:

Medição	1	2	3
Nível de Ruído [dB]	68	70	73

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{3} \times 10^{\frac{68}{10}} + 10^{\frac{70}{10}} + 10^{\frac{73}{10}} \right) = 70,82 \text{ dB}$$

- Nível de ruído médio em frequência:

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Nível de Ruído [dB]	72	68	65	60	55	50

$$L_{eq} = 10 \log \left(10^{\frac{72}{10}} + 10^{\frac{68}{10}} + 10^{\frac{65}{10}} + 10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{55}{10}} + 10^{\frac{50}{10}} \right) = 74,27 \text{ dB}$$

Embora o regulamento defina os tipos ruído existentes, estes não tem em conta a variação do nível sonoro ao longo do tempo ou da variação do nível de sonoro por banda de frequência mas sim a fonte ou fontes emissoras de ruído.

Para uma análise do ruído ao longo do tempo, pode-se ter quatro tipos de ruído. O ruído pode ser:

- Contínuo, quando o nível médio da pressão sonora se mantém mais ou menos constante ao longo do tempo.

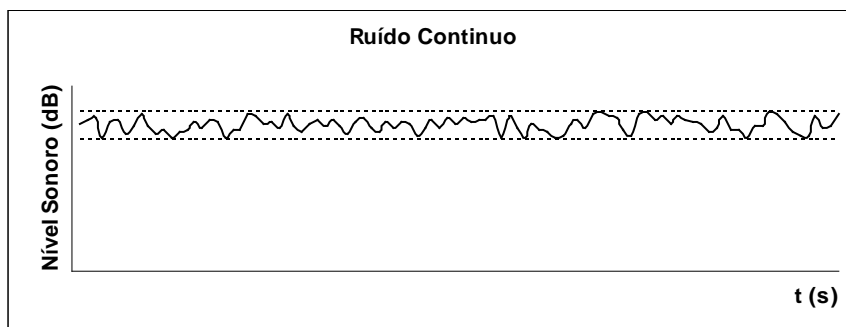


Figura 2.25 – Ruído contínuo.

- Intermitente, quando o ruído se mantém constante num determinado nível de pressão sonora e após algum tempo este sobe para outro patamar de nível de pressão, voltando ao patamar inicial passado algum tempo. Este ciclo de subida e descida de patamares é constante ao longo do tempo. Como exemplo tem-se os frigoríficos, cujo motor não está sempre a funcionar mas trabalha durante alguns períodos ao longo do tempo.

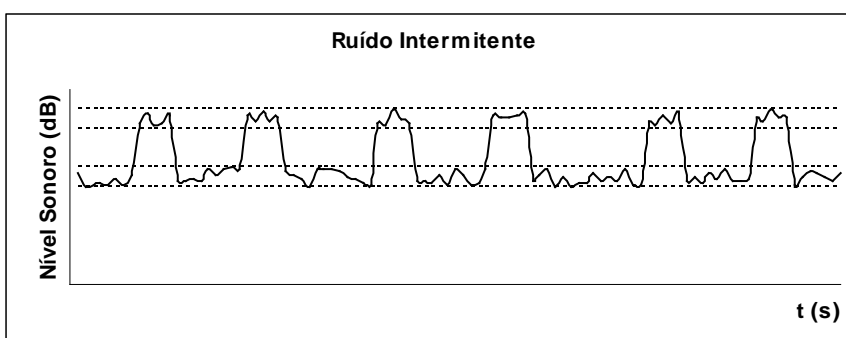


Figura 2.26 – Ruído intermitente.

- Impulsivo, quando existe um pico momentâneo de pressão sonora, mais especificamente quando o nível sonoro medido em simultâneo em integração rápida e de impulso, permitindo esta última o cálculo do nível sonoro em intervalos muito curtos: 35 a 70 milissegundos, for superior a 6 dB(A). Como exemplo tem-se a passagem de um comboio numa zona calma que faz subir bastante o nível de pressão sonora à sua passagem decrescendo para um nível muito abaixo após a sua passagem.

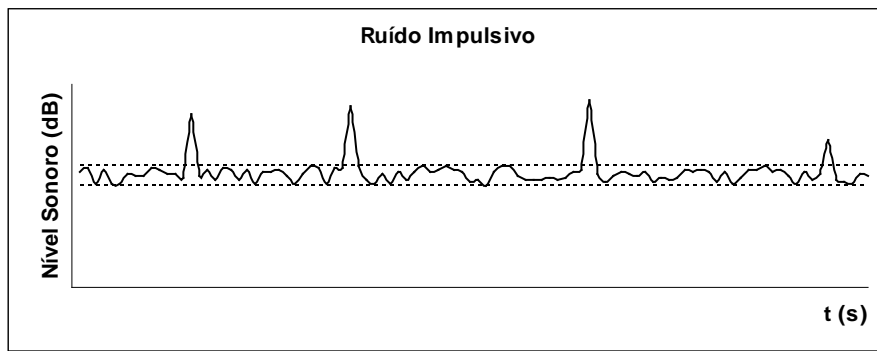


Figura 2.27 – Ruído impulsivo.

- Flutuante, quando não se consegue tipificar este ruído, ou seja sofre grandes flutuações ao longo do tempo.

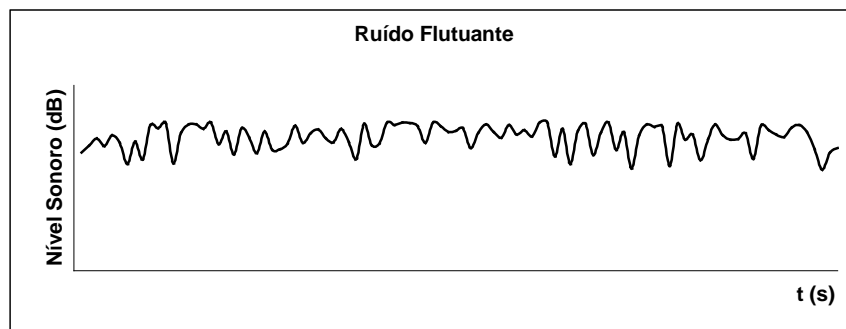


Figura 2.28 – Ruído flutuante.

Para uma análise por bandas de frequências o ruído pode ser:

- Tonal, quando para uma banda de frequência, o valor das bandas imediatamente à esquerda e à direita são, pelo menos, inferiores em 5 dB(A) ao da banda em análise.

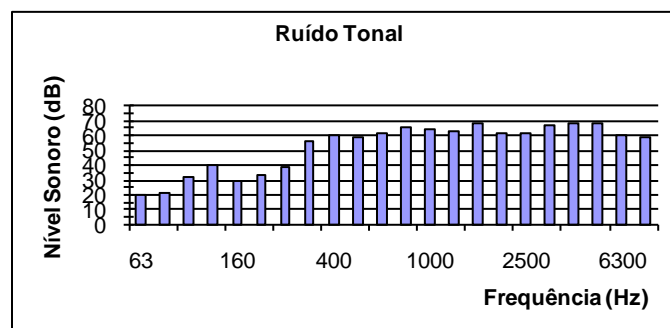


Figura 2.29 – Ruído tonal.

No exemplo da Figura 2.29 pode-se verificar que para a frequência de 125 Hz tem-se um valor de nível sonoro de 40 dB(A) e à esquerda e à direita (100Hz e 160 Hz), tem-se 32 e 30

dB(A), respectivamente. Como o valor, em ambos os lados, é inferior a 5 dB este ruído é considerado tonal.

- Baixa frequência, quando nas baixas frequências existe um maior valor de nível de pressão sonora que nas médias e altas-frequências.

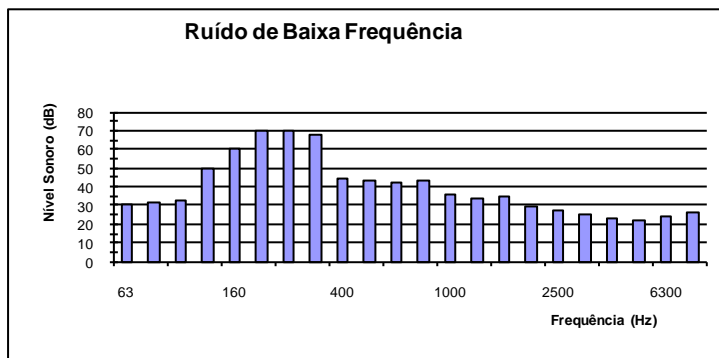


Figura 2.30 – Ruído de baixa frequência.

Dentro dos centros urbanos existem várias fontes emissoras de ruído que têm prejudicado bastante a saúde das pessoas que se encontram na sua envolvente. Contudo hoje em dia é quase impossível fugir a este tipo de ruído urbano e devido ao facto de se estar continuamente exposto a este tipo de ruído faz com que as pessoas já nem o ouçam, reparem nele, e levem uma vida aparentemente normal por psicologicamente se adaptarem ao ruído. As fontes de ruído variam com a envolvente que rodeia cada local, contudo as fontes de ruído mais comuns são:

- Tráfego, sendo este dividido em aéreo, ferroviário e rodoviário;
- Proveniente de instalações industriais, donde se destaca o ruído proveniente dos ventiladores e exaustores, dos geradores de electricidade, dos compressores, das válvulas e jactos de ar comprimido, das turbinas, dos motores a diesel e das torres de refrigeração, entre outros.

Além do ruído transmitido por via aérea existe também ruído transmitido por vibração, ou seja por via do solo à estrutura do edifício porque certas fontes irradiam energia sonora e provocam uma excitação no solo sobre o qual estão. Esta excitação espalha-se ao longo do solo e chega aos edifícios vizinhos, através da transmissão da vibração do solo para a estrutura rígida do edifício.

2.2.13. Acústica em Edifícios

Actualmente, é cada vez mais importante o conforto acústico no interior dos edifícios.

Este conforto acústico é importante quer em edifícios de serviços quer em edifícios de habitação.

Nos edifícios de serviços é importante porque cada vez mais é preciso ter alguma privacidade no tratamento de alguns assuntos confidenciais, porque não se pode incomodar os vizinhos com o ruído proveniente da nossa discoteca, café, restaurante ou mesmo com a nossa oficina. Hoje em dia tenta-se alterar o menos possível o ambiente acústico das pessoas que nos rodeiam.

O mesmo se aplica em edifícios de habitação, onde se quer ter alguma privacidade, sem ouvir as conversas dos vizinhos ou mesmo sentir quando o vizinho chega a casa pelo barulho dos sapatos no pavimento e vice-versa.

Pode-se dizer que hoje em dia um bom conforto acústico é fundamental para a conservação de uma boa qualidade de vida, quer seja no nosso local de trabalho, quer seja na nossa habitação.

Para que haja um bom conforto acústico é então necessário minimizar o nível sonoro emitido, proceder ao tratamento dos meios de transmissão e/ou proteger os de recepção.

Na acústica de edifícios, tema desta dissertação, normalmente actua-se nos meios de transmissão e, normalmente, são estudados apenas dois tipos de situações de transmissão sonora. As situações normalmente estudadas são: a transmissão sonora entre espaços fechados e a transmissão sonora no exterior, onde é contemplada a transmissão do exterior para o interior dos edifícios e a propagação do ruído no exterior.

Na transmissão sonora entre espaços fechados podem ser considerados três tipos distintos de propagação sonora, sendo eles:

- A propagação sonora no interior de um espaço fechado, ou condicionamento acústico. Esta depende, sobretudo, da geometria da sala, dos elementos interiores existentes, quer em termos de mobiliário, como cadeiras, mesas, cortinados, alcatifa, etc., como em termos de ocupação de pessoas.

O estudo do condicionamento acústico é bastante importante porque permite adequar um ambiente acústico ao volume do espaço fechado e às funções que este espaço fechado irá exercer.

- A propagação sonora, entre dois espaços, por via aérea. Esta depende, sobretudo, do isolamento sonoro que os elementos de divisão entre os dois espaços conferem. Por sua vez, este isolamento sonoro depende, como será visto com mais pormenor à frente, da massa constituinte desses elementos e da sua estanquidade ao ar.

- A propagação sonora, entre dois espaços, por via sólida de sons ou ruídos de percussão. Este depende, sobretudo, do tipo de ligações existentes entre o emissor e o receptor, da estrutura do edifício, da ligação entre os elementos de compartimentação e das características do local de aplicação da solicitação.

Além da transmissão sonora entre dois espaços fechados, como foi visto em cima, o estudo da transmissão sonora no exterior também é efectuado. Este é importante porque permite minimizar o ruído transmitido para o exterior que irá, potencialmente, afectar o nível de conforto acústico exterior e, por consequência, o dos edifícios vizinhos. A análise da transmissão sonora no exterior também é executada para que o ruído exterior tenha a menor relevância possível no conforto acústico interior.

O estudo da transmissão sonora no exterior para o caso de um edifício tem que considerar, essencialmente, dois tipos de transmissão. Um dos tipos é o estudo da transmissão do exterior para o interior do edifício que permite, posteriormente, a execução de uma envolvente adaptada ao ruído exterior. O outro tipo, é o estudo de ruídos provenientes do próprio edifício, quer do interior quer do exterior, como sistemas AVAC, que afectam directamente o nível de ruído exterior.

2.2.14. Condicionamento Acústico

Em laboratório consegue-se ter salas totalmente absorvedoras, as câmaras anecóicas, e salas totalmente reflectoras, as câmaras reverberantes.

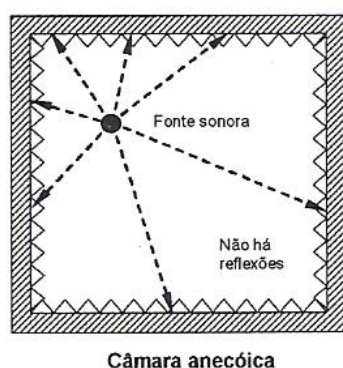


Figura 2.31 – Câmara anecóica. [20]

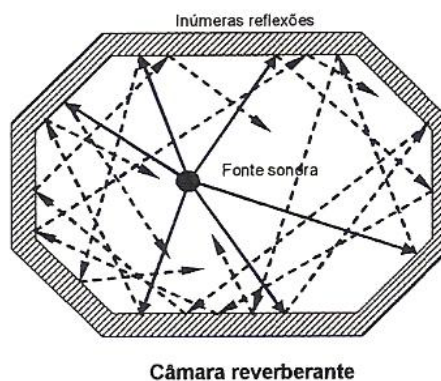


Figura 2.32 – Câmara reverberante. [20]

As câmaras anecóicas são câmaras vazias onde não existe qualquer tipo de reflexões na sua envolvente, ou seja se se colocar uma fonte emissora no seu interior a distribuição de energia sonora não será uniforme no volume da sala porque a onda sonora ao embater na envolvente é imediatamente absorvida pelo material que constitui essa parede.

As câmaras reverberantes são câmaras vazias cujas envolventes são revestidas por um material não absorvente. Ao colocar-se no seu interior uma fonte emissora de som, este som vai reflectir-se infinitamente nas paredes da câmara tornando a distribuição da energia sonora constante em qualquer ponto do volume da sala.

As câmaras anecóicas reproduzem, pelo que foi dito anteriormente, um campo sonoro livre e a câmara reverberante um campo sonoro difuso.

Apesar de não absorver a totalidade das ondas sonoras, a câmara semi-anecóica assemelha-se a uma câmara anecóica porque as suas paredes e tectos são absorventes, diferindo apenas no tipo de pavimento, que na câmara semi-anecóica é reflector.

Nos edifícios de habitação não existem campos totalmente difusos nem campos totalmente livres porque no interior destes existem vários elementos absorventes e reflectantes, ou seja uma heterogeneidade de materiais.

As paredes envolventes das salas também não absorvem nem reflectem todas as ondas incidentes, absorvendo parte da energia sonora, reflectindo outra parte e transmitindo, para o outro lado, a parte restante.

Em edifícios cujo ambiente sonoro é um parâmetro crítico, onde a qualidade sonora tem grande relevância, como é o caso das óperas, salas de música, etc., é indispensável proceder a um estudo rigoroso. Esse estudo deve ter como objectivos principais o tipo de distribuição do som pelo interior da sala, onde se deve registar pequenas diferenças de níveis sonoros em todos os pontos do seu interior, o tempo de reverberação, que deverá ser adequado à função da sala, o ruído de fundo, que deve ser tão baixo quanto possível, e a inteligibilidade do som no seu interior.

O parâmetro mais utilizado no condicionamento acústico interior em edifícios é o tempo de reverberação, contudo não faz sentido proceder ao cálculo deste parâmetro no interior de habitações uma vez que este irá sempre depender do que cada um de nós irá colocar no seu interior, por isso deve ser apenas calculado em edifícios ou locais públicos.

Uma diminuição do tempo de reverberação conduz a uma diferença mais acentuada dos níveis sonoros medidos nos vários pontos do recinto fechado. Apenas para o caso de utilização de um sistema de amplificação sonora no interior do espaço fechado é possível reduzir o tempo de reverberação sem que se verifique uma diferença acentuada dos níveis sonoros nos vários pontos do seu interior.

O tempo de reverberação corresponde ao intervalo de tempo necessário para que haja um decaimento no nível de pressão sonora de 60 dB, após a paragem da emissão de som por parte da fonte sonora.

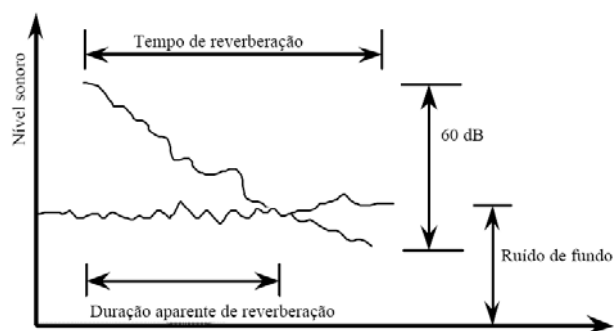


Figura 2.33 – Tempo de reverberação. [11]

Contudo raramente, na prática, se consegue obter um intervalo tão grande entre o nível máximo de som emitido pela fonte e o ruído de fundo ⁽¹⁾. Para colmatar este problema, normalmente faz-se extrapolações para decaimentos de 20 ou 30 dB. Por exemplo, supondo que apenas se obteve 20 dB de decaimento e que estes demoraram 5 segundos, extrapolando obtém-se um valor de $T_r = 5 \times \frac{60}{20} = 15 \text{ s}$.

Além da medição *in situ* o tempo de reverberação também pode ser calculado em projecto.

Existem várias expressões de cálculo para a previsão do tempo de reverberação em projecto, sendo a mais simples e vulgarmente utilizada, a fórmula de Sabine.

A fórmula de Sabine foi desenvolvida a partir de estudos em naves de igrejas e por isso é aplicável em salas muito reverberantes.

Para ambientes com temperaturas entre os 18 °C e os 20 °C, normalmente utiliza-se a expressão de Sabine:

$$T_R = \frac{0,161 \times V}{A_{eq}} \quad [\text{s}] \quad (2.16)$$

Para outras temperaturas a expressão usada é:

$$T_R = \frac{55,2 \times V}{A_{eq} \times c_0} \quad [\text{s}] \quad (2.17)$$

onde:

- V – volume da sala;

⁽¹⁾ Ruído de fundo é o tipo de ruído que existe num determinado local quando nele não se exerce qualquer tipo de actividade. Este ruído pode ter várias origens, como o funcionamento de equipamentos de climatização, sistemas eléctricos, hidráulicos, ruído proveniente do exterior, entre outros.

- A_{eq} – área de absorção sonora equivalente;
- c_0 – velocidade de propagação do som no ar;

A área de absorção sonora equivalente é um dos termos necessários para o cálculo do tempo de reverberação pela fórmula de Sabine, como se pode ver pelas expressões de cima, permitindo este parâmetro quantificar, na expressão, a absorção das ondas sonoras dos elementos constituintes da sala.

A área de absorção sonora equivalente pode ser obtida pela expressão:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_i + \sum_{j=1}^n n_j \times A_j \quad [m^2] \quad (2.18)$$

onde:

- S_i – área do elemento;
- α_i – coeficiente de absorção sonora;
- n_j – número de elementos existentes na sala;
- A_j – área de absorção equivalente desses elementos;

Alguns valores de A e α estão tabelados na norma EN 12354-1. Contudo, os que não existem na norma podem ser obtidos experimentalmente através da comparação do tempo de reverberação de uma sala com e sem esse objecto.

Por exemplo, supondo que inicialmente se tem uma sala vazia com 200 m^3 de volume e que o tempo de reverberação obtido é igual a 8 segundos.

$$T_{R_{inicial}} = \frac{0,16 \times 200}{A_{eq}} = 8 \Rightarrow A_{eq} = \frac{32}{8} = 4 \text{ m}^2$$

Após obter-se o tempo de reverberação, colocou-se no interior da sala um objecto com 10 m^2 , tendo o tempo de reverberação passado para 5 segundos.

$$T_{R_{final}} = \frac{0,16 \times 200}{A_{eq}} = 5 \Rightarrow A_{eq} = \frac{32}{5} = 6,4 \text{ m}^2$$

Donde se conclui que:

$$\Delta A_{eq} = A_{eq,final} - A_{eq,inicial} = 6,4 - 4 = 2,4 \text{ m}^2$$

Logo:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_i + \sum_{j=1}^n n_j \times A_j = 2,4 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = 10 \times \alpha \Rightarrow \alpha = \frac{2,4}{10} = 0,24$$

ou seja, o coeficiente de absorção sonora do objecto colocado no interior da sala é igual a 0,24.

Apesar de a fórmula de Sabine ser a mais utilizada, existem outras, como a expressão de Eyring e de Millington, que permitem a previsão do tempo de reverberação.

Tendo em conta a seguinte simplificação do cálculo da área de absorção sonora equivalente:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_i + \sum_{j=1}^n n_j \times A_j = S \times \bar{\alpha} \quad [\text{m}^2] \quad (2.19)$$

onde:

- $\bar{\alpha}$ – coeficiente de absorção sonora médio das superfícies do compartimento;
- S – superfície total dos parâmetros envolventes da sala;

Para valores de:

- $\bar{\alpha} < 0,15$, a fórmula de Sabine é a que mais se aproxima da realidade
- $\bar{\alpha} \geq 0,15$, a fórmula de Eyring ou a de Millington são as que se aproximam mais da realidade.

Quando $\bar{\alpha} \geq 0,15$ deve-se recorrer à fórmula de Eyring quando a distribuição de elementos absorsores é mais uniforme; quando é menos uniforme, deve-se recorrer à fórmula de Millington.

Fórmula de Eyring:

$$T_R = \frac{-0,16 \times V}{S_{total} \times \ln(1 - \bar{\alpha})} = \frac{-0,16 \times V}{2,3 \times S_{total} \times \log(1 - \bar{\alpha})} \quad [\text{s}] \quad (2.20)$$

Fórmula de Millington:

$$T_R = \frac{-0,16 \times V}{\sum_{i=1}^n S_i \times \ln(1 - \bar{\alpha}_i)} = \frac{-0,16 \times V}{2,3 \times \sum_{i=1}^n S_i \times \ln(1 - \bar{\alpha}_i)} \quad [s] \quad (2.21)$$

Apesar de a partir dos 1.000 Hz já se fazer sentir a absorção sonora pelo ar, esta deverá ser contabilizada para frequências superiores a 2.000 Hz, utilizando a seguinte fórmula:

$$T_R = \frac{0,16 \times V}{A_{eq} + 4 \times m \times V} \quad [s] \quad (2.22)$$

onde:

- m – valor do coeficiente de atenuação sonora, dependendo este da temperatura e da humidade do ar, existindo valores tabelados na norma EN 12354-6.

Num espaço fechado é preciso ter cuidado com a adequada distribuição do som no seu interior para que se minimize, tanto quanto possível, as variações dos níveis sonoros tendo o cuidado de respeitar os tempos de reverberação indicados para a função desse espaço fechado, dependendo este do tipo de utilização e do volume da sala, evitando desta forma fenómenos de reflexão indesejáveis, como os ecos, múltiplos ecos e a focalização das ondas sonoras.

Os ecos múltiplos são repetições múltiplas, com intervalos de tempo muito pequenos, de sons emitidos por determinada fonte emissora e aparecem quando existe duas superfícies paralelas reflectoras entre a fonte emissora.

Quando duas reflexões sucessivas demoram cerca de 50 milissegundos, o ouvido humano tem capacidade para distingui-las, designando-se este fenómeno por eco. Contudo para que haja eco não são necessárias que hajam duas reflexões; para que ocorra o fenómeno de eco basta apenas que exista no espaço fechado superfícies reflectoras e que a diferença entre os trajecto do som directo e do som indirecto seja de pelo menos 17m entre a fonte emissora e o receptor.

Para espaços onde seja imprescindível uma boa audição do orador e para uma velocidade de conversação normal, como numa sala de aula, é conveniente que o tempo de reverberação seja baixo para não provocar a fadiga dos ouvintes e para que a conversa seja totalmente inteligível.

Se a função do espaço é ser uma sala de espectáculos, o tempo de reverberação poderá ser superior, variando novamente com o tipo de espectáculo.

O tempo de reverberação varia também com o volume do espaço, devendo este aumentar com o aumento de volume da sala.

Além da variação com a função e o volume do espaço o tempo de reverberação também varia com a frequência, devendo este aumentar com a diminuição da frequência.

Como exemplo, tem-se de seguida uma figura onde são visíveis os tempos de reverberações óptimos para a frequência dos 500 Hz de alguns locais com volumes que podem variar entre os 100m³ e os 50.000 m³.

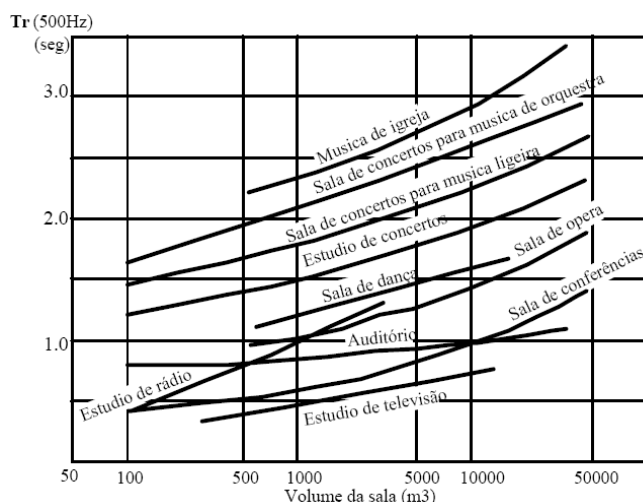


Figura 2.34 – Tempos de reverberação ideais para alguns tipos de salas. [11]

O regulamento dos requisitos acústicos de edifícios impõe alguns limites de tempo de reverberação para a média ponderada entre os tempos de reverberação dos 500, 1.000 e 2.000 Hz.

Ou seja:

$$T_R = \frac{T_{R500} + T_{R1000} + T_{R2000}}{3} \leq 0,15 \times V^{1/3} \quad [s] \quad (2.23)$$

Para os seguintes espaços:

- Refeitórios;
- Recintos públicos de restauração;
- Escritórios com um volume superior a 100 m³;
- Salas de aula;
- Salas polivalentes;
- Ginásios;
- Enfermarias;

- Átrios e salas de espera sem difusão de mensagens sonoras; no caso de existir a difusão de mensagens sonoras: $T_R \leq 0,12 \times V^{1/3}$;

Para que estes limites não sejam ultrapassados convém na altura do projecto ter-se em conta soluções que permitem baixar o tempo de reverberação para que não haja o problema de após a obra feita, um eventual incumprimento dar origem a custos de adaptação.

Para a redução do tempo de reverberação existem no mercado vários tipos de materiais, podendo estes ser de quatro tipos diferentes:

- Materiais absorventes clássicos;
- Painéis ressonantes;
- Ressonadores de Helmholtz;
- Painéis de face perfurada;

Os materiais absorventes clássicos são materiais de célula aberta de elevada absorção acústica. Estes absorventes podem ser do tipo fibroso ou poroso.

Nos do tipo fibroso as ondas provocam a vibração das fibras assim como o ar que existe entre as fibras, provocando uma diminuição da energia sonora devido ao atrito existente entre as fibras e a dissipação desta sobre a forma de calor.

Nos do tipo poroso a energia sonora é dissipada sob a forma de calor devido às múltiplas reflexões que esta sofre no seu interior. Este tipo de material aumenta a sua eficácia com a diminuição do comprimento de onda do som.

Os painéis ressonantes são painéis que absorvem a energia sonora através da sua vibração, ou seja assemelham-se a molas que vão dissipar parte da energia sonora, diminuindo o tempo de reverberação.

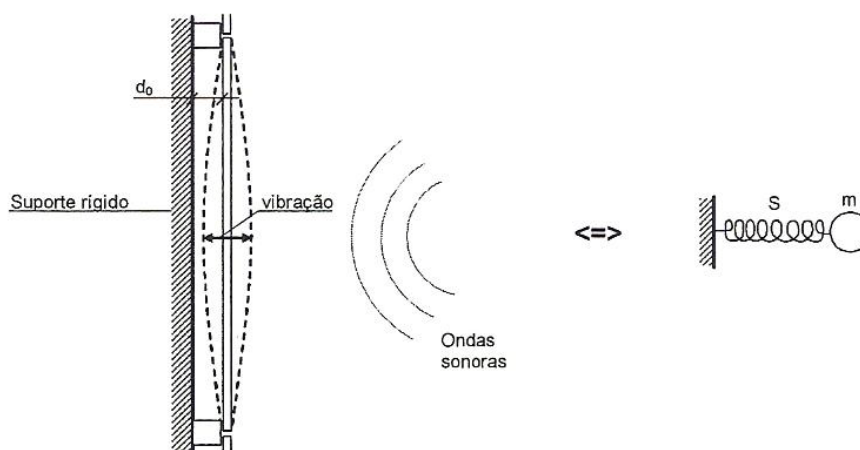


Figura 2.35 – Painel ressonante. [20]

Por equilíbrio de pressões entre a caixa-de-ar, existente atrás do painel, e o exterior obtém-se a frequência característica do painel:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 \times c^2}{m \times d_0}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.24)$$

onde:

- ρ_0 – densidade do ar;
- c – velocidade de propagação do som no ar;
- m – massa superficial do painel;
- d_0 – espessura da caixa de ar existente atrás do painel;

Para uma temperatura de 15° C tem-se, simplificadaamente:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m \times d_0}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.25)$$

Através do uso experimental desta fórmula conseguiu-se concluir que com a fórmula de Kristensen consegue-se obter valores mais próximos à frequência característica do painel. A formula de Kristensen é igual a:

$$f_0 = \frac{50}{\sqrt{m \times d_0}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.26)$$

A frequência característica corresponde à frequência onde o painel tem a melhor absorção das ondas sonoras.

Neste tipo de painel a colocação de qualquer tipo de material absorvente clássico no interior da caixa-de-ar não vai ter quase nenhuma influência na redução do tempo de reverberação porque irá funcionar apenas como amortecedor do painel. Este caso é identificável no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 – Coeficientes de absorção por frequência. [20]

Materiais e condições de montagem	α					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Painéis ressonantes de contraplacado ($\rho = 700 \text{ kg/m}^3$), com 13 mm de espessura, confinando camada de ar com 25 mm de espessura.	0,25	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05
Painéis ressonantes de contraplacado, com 13 mm de espessura, confinando camada de ar, com 25 mm de espessura, preenchida com lã de vidro	0,25	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05

Para ambos os tipos de painéis utilizados no Quadro 2.7 a frequência característica será igual a:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{(700 \times 0,013) \times 0,025}} = 104,8 \text{ Hz}$$

Os ressoadores de Helmholtz, à semelhança dos painéis ressonantes, também têm uma frequência característica para a qual têm a sua maior eficácia na absorção das ondas sonoras.

Estes permitem a diminuição do tempo de reverberação através da absorção de parte da energia sonora devido ao efeito mola que se verifica quando as ondas sonoras incidem na sua abertura.

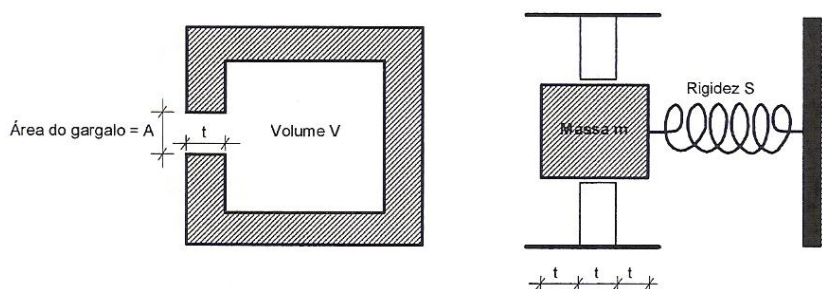


Figura 2.36 – Ressonador de Helmholtz. [20]

Pela relação entre as pressões, interior e exterior do ressonador, obtém-se a seguinte expressão para a frequência:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi\sqrt{3}} \times \sqrt{\frac{A}{t \times V}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.27)$$

onde:

- c – velocidade de propagação das ondas sonoras no ar;
- A – área de abertura do ressoador;
- t – espessura da abertura do ressoador;
- V – volume do ressoador;

Para uma temperatura de 15 °C tem-se:

$$f_0 = 31,3 \times \sqrt{\frac{A}{t \times V}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.28)$$

Os ressoadores, novamente à semelhança dos painéis ressonantes, também podem ser revestidos no seu interior por materiais absorventes clássicos, contudo, ao contrário do que acontece nos painéis, estes materiais vão tornar o ressoador menos eficaz na sua frequência característica mas mais eficaz nas restantes frequências.

Esta situação pode ser observada no Quadro 2.8 e na Figura 2.37:

Quadro 2.8 – Coeficientes de absorção por frequência. [20]

Materiais e condições de montagem	α					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Painéis de réguas de madeira de 55mmX20mm, com frestas aparentes de 3mm de largura, confinando camada de ar com 50 mm de espessura	0,15	0,63	0,40	0,22	0,27	0,25
Painéis de réguas de madeira de 55mmx20mm, com frestas aparentes de 3mm de largura, confinando camada de ar com 50 mm de espessura preenchida com lã de vidro	0,32	0,82	0,54	0,38	0,28	0,22

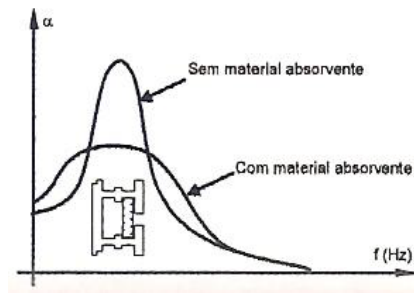


Figura 2.37 – Absorção sonora de dois ressoadores diferentes ao longo da frequência. [20]

Pela comparação entre a figura e o quadro pode-se concluir que o ressonador sem qualquer tipo de material absorvente no seu interior só é muito eficaz numa frequência apenas, sendo nas restantes muito pouco eficaz. Com a colocação de um material absorvente no seu interior ele deixa de ser tão eficaz numa só frequência, passando a ter uma eficácia mais distribuída ao longo das frequências adjacentes à característica.

Os painéis perfurados são painéis, como o nome indica, com a face perfurada (Figura 2.38). Estes têm um comportamento que se assemelha à soma do comportamento dos materiais absorventes clássicos, com o dos painéis ressoantes e com os ressoadores de Helmholtz.

A frequência característica destes, para uma temperatura de 15° C, é obtida através da seguinte expressão:

$$f_0 = 50,8 \times \sqrt{\frac{F}{d_0 \times (t + 0.8 \times \phi)}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.29)$$

onde:

- d_0 – à espessura da caixa de ar, sem contabilizar a espessura do material absorvente;
- t – espessura do painel;
- ϕ – diâmetro da furação, caso haja vários diâmetros de furação é considerado o valor médio;
- F – percentagem de perfuração que é dado pela seguinte expressão:

$$F = \frac{A_{\text{perfurada}}}{A_{\text{painel}}} \quad (2.30)$$

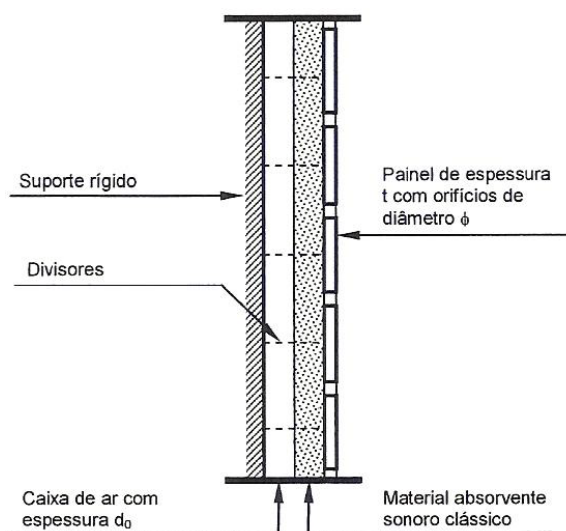


Figura 2.38 – Painel perfurado. [20]

Nestes painéis a área de perfuração tem influência directa na frequência característica do painel. O aumento do valor da área de perfuração faz aumentar a frequência característica do painel, como se pode verificar no Quadro 2.9.

Quadro 2.9 – Coeficientes de absorção por frequência. [20]

Materiais e condições de montagem	α					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Painel compostos de contraplacado de madeira de 13 mm de espessura, com perfurações de 5 mm de diâmetro e 5,5% de área aberta, confinando camada de ar com 60 mm de espessura preenchida com lã mineral	0,47	0,94	0,60	0,35	0,25	0,19
Painel compostos de contraplacado de madeira de 13 mm de espessura, com perfurações de 5 mm de diâmetro e 16,5% de área aberta, confinando camada de ar com 60 mm de espessura preenchida com lã mineral	0,35	0,86	0,86	0,64	0,50	0,39

A frequência característica dos painéis utilizados no Quadro 2.9 são, respectivamente:

$$f_{0,5,5\%} = 50,8 \times \sqrt{\frac{0,055}{0,060 \times (0,013 + 0,8 \times 0,005)}} = 373,0 \text{ Hz}$$

$$f_{0,16,5\%} = 50,8 \times \sqrt{\frac{0,165}{0,060 \times (0,013 + 0,8 \times 0,005)}} = 646,1 \text{ Hz}$$

Pela figura seguinte verifica-se o comportamento de cada tipo de material, o coeficiente de absorção acústica para cada frequência, donde se conclui que para baixas frequências os painéis ressonantes (membranas) são os mais indicados, para frequências médias os ressoadores de Helmholtz são os melhores e para altas frequências os materiais porosos são os melhores. Contudo se se tiver uma gama de frequências muito diversa os painéis mistos são os indicados.

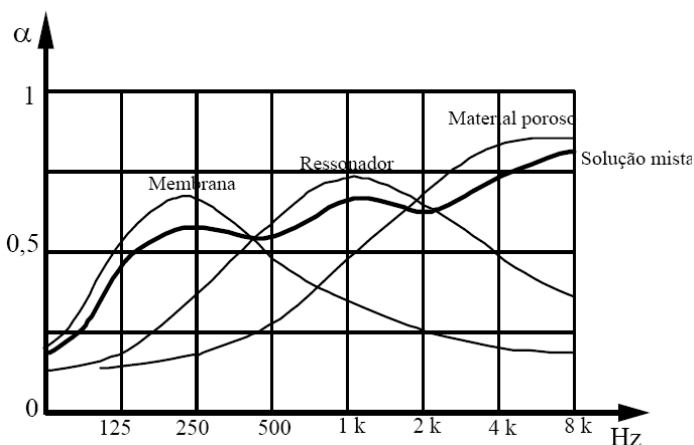


Figura 2.39 – Absorção sonora, por frequência e por tipo de material. [11]

Além do tempo de reverberação, no interior de espaços fechados, também é importante a quantificação da inteligibilidade dos sons ou palavras.

Este parâmetro, obtido por via experimental pelo índice RASTI (índice de transmissão rápida de linguagem), avalia a quantidade de sons ou palavras inteligíveis relativamente à totalidade dos sons ou palavras emitidas. Este toma valores que pode variar entre 0, quando a inteligibilidade é nula, e 1, quando a inteligibilidade é perfeita. Contudo na prática estes valores, 0 e 1, são utópicos sendo considerado uma inteligibilidade aceitável para valores entre 0,5 e 0,64, boa entre os 0,65 e os 0,85 e excelente acima dos 0,85.

Os factores que mais influenciam a inteligibilidade dos sons ou palavras são os múltiplos ecos, os ecos e a focalização das ondas, à semelhança do tempo de reverberação.

Como se pode verificar, as soluções construtivas adoptadas podem ter grande relevância sobre a acústica da sala, contudo não são apenas as soluções construtivas que são importantes, a geometria da própria sala também é bastante relevante na acústica da sala, como pode ser observado nos exemplos da Figura 2.40.

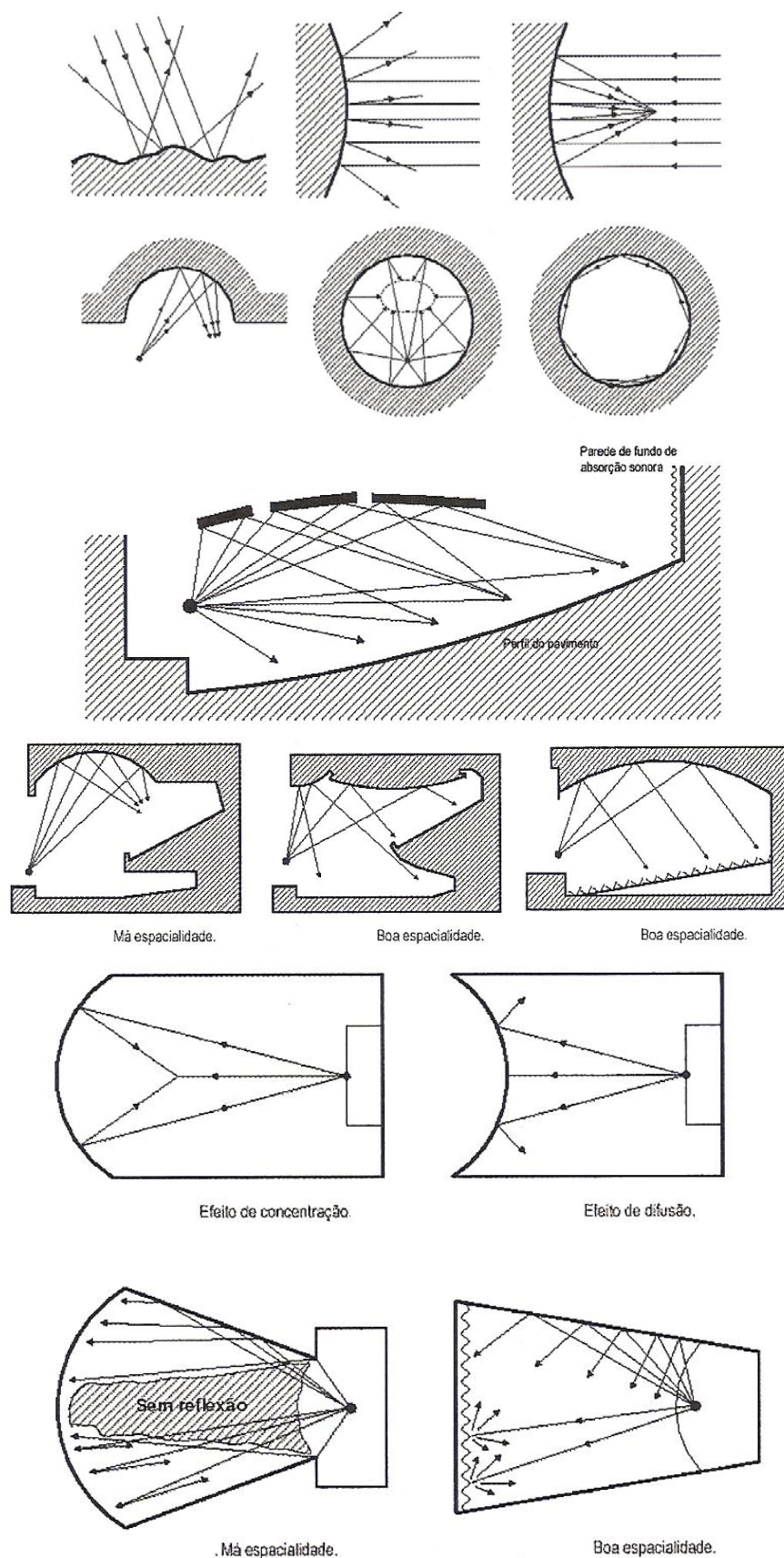


Figura 2.40 – Exemplos do comportamento das ondas sonoras no interior de uma sala. [20]

Para finalizar pode-se verificar na Figura 2.41 que o facto de subir o nível da plateia irá reduzir o trajecto das ondas reflectidas, aumentando a inteligibilidade do som ou das palavras.

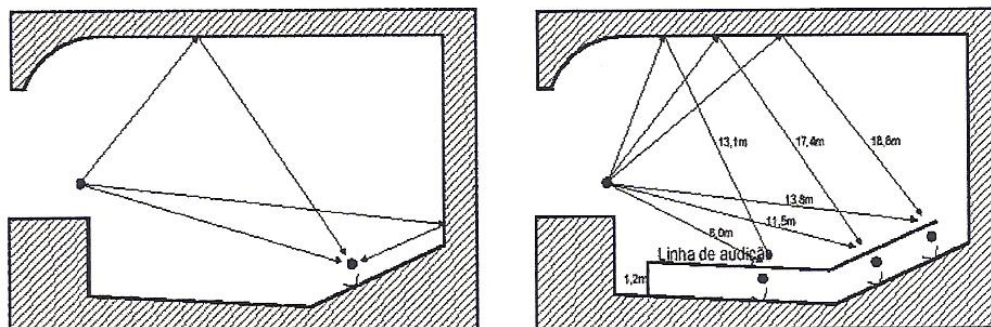


Figura 2.41 – Exemplos do comportamento das ondas sonoras no interior de uma sala. [20]

2.3. Propagação Sonora por Via Aérea

A propagação do som por via aérea é um dos aspectos que maior relevância tem no estudo do comportamento acústico de um edifício. Neste estudo deve ser analisado o isolamento acústico conferido quer pelos elementos de fachada quer pelos elementos de divisória interior. Esta análise deve ter em conta as exigências funcionais estabelecidas e suportadas pela regulamentação em vigor, de forma a conferir um conforto acústico adequado.

O campo sonoro existente no interior de um edifício irá depender do tipo de fonte emissora de som e da composição espectral do som emitido. Além de ser útil a definição da fonte sonora, também é útil saber qual é a sua proveniência de forma a adequar o tipo de isolamento a aplicar. Tendo em conta a origem do ruído ou som, pode-se definir um som como tendo origem interior ou exterior.

Os sons de origem exterior são, genericamente, produzidos pelo tráfego rodoviário e ferroviário. Contudo, em zonas sob rotas aéreas próximas de instalações aeroportuárias, zonas próximas de áreas industriais e zonas próximas de locais de divertimento público, os campos gerados por estes tipos de uso junto dos edifícios vizinhos podem ser bastante incomodativos. Deste modo, em fase de projecto deve-se ter em conta o local de implantação da obra e quais as fontes de ruído exteriores para que se possa minimizar ao máximo o seu efeito no interior das habitações.

Os sons de origem interior são aqueles que têm origem no interior do próprio edifício, ou seja o ruído produzido devido à utilização do edifício, podendo ter origem na utilização do espaço pelos seus ocupantes ou no funcionamento de equipamentos.

Os sons de origem exterior vão condicionar o tipo de envolvente utilizada enquanto que os sons de origem interior os elementos de compartimentação, como é facilmente perceptível.

A legislação nacional e internacional apresenta uma lacuna quanto ao tipo de isolamento sonoro a conferir às coberturas. Assim, considera-se geralmente adequada a utilização, para coberturas, do índice relativo a fachadas e/ou elementos de fachadas.

O cálculo do índice de isolamento acústico a sons aéreos pode ser executado segundo dois tipos de métodos: o método de medição, que consiste em obter o valor do índice através de medições *in situ* ou laboratoriais, e o método de previsão, que tem como base modelos teóricos, normalmente utilizados em fase de projecto ou de concepção.

2.3.1. Método de Medição

O método de medição ou experimental pode recorrer a três técnicas de medição distintas:

- O método da caracterização experimental – este é o método comumente utilizado para a quantificação do isolamento sonoro a sons aéreos. Para a realização deste método é necessário cumprir as normas EN ISO 140-3:1995, EN ISO 140-4:1998 e EN ISO 140-5:1998 para medições em laboratório, medições *in situ* entre compartimentos e medições *in situ* de fachadas, respectivamente. Este vai ser o método que, por ter maior relevância actualmente, irá ser analisado de seguida.
- O método da holografia acústica – é o método menos utilizado mas é aquele que tem apresentado maiores evoluções nos últimos tempos. Este permite criar reconstruções tridimensionais de ondas sonoras, correspondentes à envolvente da fonte. Para a realização deste método é necessário um campo aberto e uma câmara anecóica ou uma semi-anecóica, para que não haja um campo sonoro reflectido.
- O método da intensimetria acústica – é um método utilizado, sobretudo, na avaliação da potência sonora dos equipamentos e na caracterização de campos de vibração.

A norma EN ISO 140-3:1995 especifica as medições feitas em laboratório. Através da norma é possível calcular, laboratorialmente, o índice de isolamento sonoro a sons aéreos

de soluções construtivas sem que este seja afectado da transmissão marginal, tema que será tratado mais à frente, ou seja considera apenas a transmissão sonora directa entre dois compartimentos.

Para a quantificação laboratorial do índice de isolamento sonoro a sons aéreos são necessárias duas salas, uma receptora e outra emissora. Na sala emissora são colocados microfones que medem o nível sonoro existente na sala emissora e uma fonte emissora de som que, como o próprio nome indica, produz o som. Na sala receptora são colocados microfones, que medem o nível sonoro que chega a essa sala. Na separação entre as salas é construído ou colocado o elemento em estudo, tendo o cuidado de não deixar nenhum elemento rígido a estabelecer uma ligação entre ambas as salas, para que não ocorra transmissão marginal, como é demonstrado na imagem seguinte.

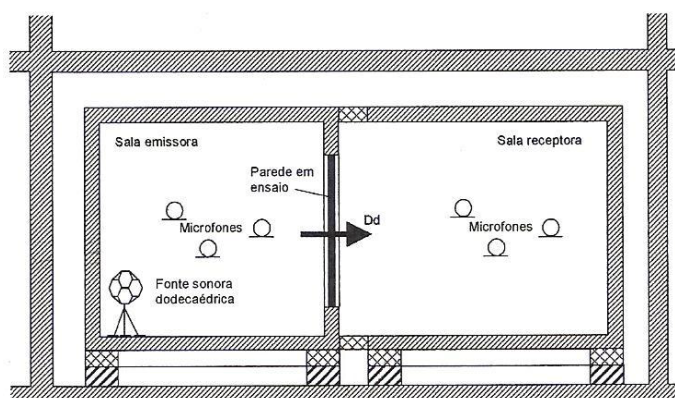


Figura 2.42 – Exemplo de laboratório de medição de isolamentos a sons aéreos. [20]

Na Figura 2.42 é perceptível a existência dos elementos resilientes, quer na base das salas quer no contacto entre salas, para que o som atravessasse de uma sala para a outra apenas por via aérea e não pela via estrutural.

Considerando como hipótese teórica que ambos os campos são difusos, e que a transmissão sonora se dá apenas por via directa, pode-se definir o W_{emissor} , que representa a potência sonora incidente do lado emissor e o W_{receptor} , que representa a potência sonora transmitida pela sala receptora.

$$I_{\text{emissor}} = \frac{W_{\text{emissor}}}{S} \Rightarrow W_{\text{emissor}} = \frac{p_{\text{emissor}}^2}{4 \times \rho_0 \times c} \times S \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.31)$$

$$I_{\text{receptor}} = \frac{W_{\text{receptor}}}{S} \Rightarrow W_{\text{receptor}} = \frac{p_{\text{receptor}}^2}{4 \times \rho_0 \times c} \times A_{\text{receptor}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.32)$$

onde:

- p – pressão registada em cada local;
- S – área da parede em estudo;

- A_{receptor} – área de absorção sonora da sala receptora;

Logo o coeficiente de transmissão sonora será igual a:

$$\tau = \frac{W_{\text{emissor}}}{W_{\text{receptor}}} = \frac{p_{\text{receptor}}^2}{p_{\text{emissor}}^2} \times \frac{A_{\text{receptor}}}{S} \quad (2.33)$$

Como a escala de valores seria muito grande, passa-se este coeficiente para uma escala logarítmica, obtendo-se o índice de redução sonora, que é dado pela expressão:

$$R = 10 \log(\tau^{-1}) = 10 \log\left(\frac{p_{\text{emissor}}^2}{p_{\text{receptor}}^2} \times \frac{S}{A_{\text{receptor}}}\right) = 10 \log\left(\frac{p_{\text{emissor}}^2}{p_0^2} \times \frac{p_0^2}{p_{\text{receptor}}^2} \times \frac{S}{A_{\text{receptor}}}\right)$$

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{S}{A_{\text{receptor}}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.34)$$

onde:

- L_1 – nível médio da pressão sonora da sala emissora;
- L_2 – nível médio da sala receptora;

Em laboratório, segundo a norma NP EN ISO 140-3, pode-se calcular este índice tendo em conta o tempo de reverberação porque a área equivalente de absorção é igual à área de absorção sonora da sala receptora.

Recordando o tempo de reverberação:

$$T_R \approx \frac{0,16 \times V}{A_{\text{eq}}} \quad [\text{s}] \quad (2.35)$$

Logo o índice de redução sonora obtido laboratorialmente vai ser igual a:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{S \times T_R}{0,16 \times V}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.36)$$

In situ e segunda a norma EN ISO 140-4, o índice de redução sonora aparente é igual a:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.37)$$

onde:

- A – área de absorção sonora do local receptor;

Este índice difere do laboratorial no valor do parâmetro L_2 que em laboratório não entra com os valores das transmissões marginais por não existirem enquanto que *in situ* elas existem e não se conseguem separar do valor do índice de redução sonora obtido *in situ*.

O método experimental para o cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado, D_n , é muito idêntico ao método utilizado para o cálculo do índice de redução sonora, havendo apenas a diferença que o índice de redução sonora é obtido em laboratório e o isolamento sonoro *in situ*. Na expressão de cálculo o parâmetro S irá ser substituído pelo parâmetro A_0 , correspondendo este à área de absorção sonora de referência, que para compartimentos de habitação ou com dimensões comparáveis, é considerado igual a 10 m^2 .

A expressão do isolamento, sonoro a sons de condução aérea normalizado entre compartimentos, D_n , segundo o Decreto-lei 129/2002, é igual a:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.38)$$

onde:

- A – área de absorção sonora do local receptor;
- A_0 – área de absorção sonora de referência para salas correntes de edifícios de habitação, 10 m^2 ;

Com a entrada em vigor do Decreto-Lei 96/2008 o cálculo deste isolamento passou a ser feito segundo os tempos de reverberação em vez das áreas de absorção. Este é calculado pela seguinte expressão:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.39)$$

Simplificando a expressão do isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado entre compartimentos existente no Decreto-Lei 129/2002, obtém-se:

$$\begin{aligned}
D_n &= L_1 - L_2 - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) = \\
&= \left[L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \right] - 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \\
&= R' - 10 \log \left(\frac{S}{A} \times \frac{A}{A_0} \right) \\
D_n &= R' - 10 \log \left(\frac{S}{A_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.40)
\end{aligned}$$

Simplificando, agora, a expressão existente no Decreto-Lei 96/2008:

$$\begin{aligned}
D_{nT} &= L_1 - L_1 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) = \\
&= \left(L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \right) - 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) = \\
&= R' + 10 \log \left(\frac{A}{S} \times \frac{T}{T_0} \right) = R' + 10 \log \left(\frac{A}{S} \times \frac{0,16 \times V}{A} \times \frac{1}{0,5} \right) \\
D_{nT} &= R' + 10 \log \left(\frac{0,32 \times V}{S} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.41)
\end{aligned}$$

onde:

- T_0 – tempo de reverberação de referência (normalmente, 0,5 segundos excepto quando haja tempo de reverberação atribuível em projecto);

Pela comparação das duas expressões pode-se concluir que no DL 128/2002 a expressão não depende do tempo de reverberação e que esta é demasiado conservativa para paredes de maiores dimensões devido ao facto de utilizar a área de absorção sonora de referência de 10 m². No DL 96/2008 a expressão é menos conservativa, menos penalizadora, para paredes de maiores dimensões porque apenas utiliza o valor do volume da sala e área da parede em estudo.

Para que em ensaios *in situ* se obtenha valores fiáveis deve-se considerar o seguinte limite [20]:

$$L_2 = L_{p,\text{ruído de fundo}} + 10\text{dB} \quad (2.42)$$

Todavia, deve-se ter atenção para não colocar a fonte com potência em excesso porque quanto maior for a potência sonora emitida maior irão ser as transmissões marginais e consequentemente a perda de fiabilidade do índice de isolamento da solução em análise.

Além das medições entre compartimentos, também existe uma norma, como já foi referido anteriormente (EN ISO 140-5:1998) que permite a quantificação do isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado em fachadas, $D_{2m, n}$.

O valor deste isolamento é obtido de forma idêntica ao do D_n , só que neste caso a fonte é colocada no exterior e a pressão sonora no local emissor, que neste caso é o exterior, é medido a 2 metros da fachada do edifício.

A expressão do isolamento sonoro a sons de condução aérea da fachada, segundo o Decreto-Lei 129/2002 e o 96/2008, é igual a:

- DL 129/2002

$$D_{2m, n} = L_{1,2m} - L_2 - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.43)$$

$$D_{2m, n} = R'_{45^\circ} + 10 \log \left(\frac{A_0 \times T_R}{0.16 \times V} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.44)$$

- DL 96/2008

$$D_{2m, nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.45)$$

$$D_{2m, nT} = R'_{45^\circ} + 10 \log \left(\frac{0.32 \times V}{S} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.46)$$

onde:

- R'_{45° – índice de redução sonora aparente calculado a 2m da fachada quando a fonte sonora se encontra no exterior e o ângulo de incidência sonora é próximo dos 45° ;

As normas referidas em cima obrigam a que estes ensaios sejam feitos em bandas de terço de oitava, entre as frequências centrais dos 100 e 5.000 Hz para medições em laboratório e 100 e 3.150 Hz para medições *in situ*. Apesar de estes intervalos serem os referidos nas normas, também se pode fazer, adicionalmente, para bandas de baixa de frequência, situando-se nas frequências centrais de 50, 63 e 80 Hz. Para que seja possível fazer uma comparação entre os valores obtidos laboratorialmente e os valores obtidos *in situ*, pode-se calcular o isolamento para as bandas centrais dos 4.000 e 5.000 Hz.

Para permitir a verificação dos valores obtidos com os requisitos legais ou mínimos é necessário passar os valores de isolamento em bandas de frequência para valores únicos. Estes valores únicos são obtidos através do ajustamento da curva de referência às curvas de isolamento, passando os valores de R , D_n e $D_{2m,n}$ a R_w , $D_{n,w}$ e $D_{2m,n,w}$, respectivamente.

A curva de referência é uma curva constituída por 16 pontos, representando cada ponto uma frequência central em terços de oitava, indo deste os 100 Hz aos 3.150 Hz.

A curva de referência tem os seguintes valores:

Quadro 2.10 – Valores da curva de referência.

Frequência (Hz)	Curva de Referência [dB]
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56

Para facilitar o ajustamento da curva de referência à do isolamento, calcula-se a diferença entre o ponto de 100 Hz e os restantes, servindo depois este ponto como referência para os restantes.

Quadro 2.11 – Valores da curva de referência.

Frequência (Hz)	Curva de Referência [dB]
100	X
125	X+3
160	X+6
200	X+9
250	X+12
315	X+15
400	X+18
500	X+19
630	X+20
800	X+21
1000	X+22
1250	X+23
1600	X+23
2000	X+23
2500	X+23
3150	X+23

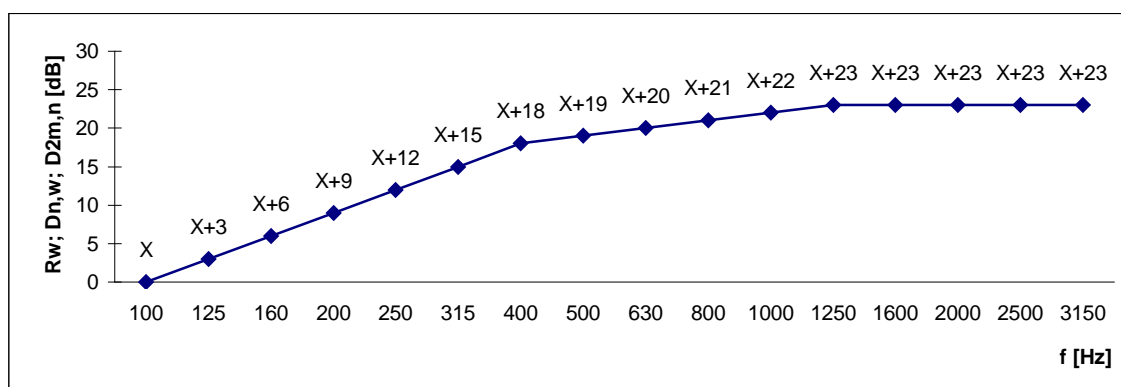


Figura 2.43 – Curva de referência.

Para a definição do parâmetro X tem-se de escolher um valor para este de modo a que a soma, em módulo, de todas as diferenças negativas entre a curva de isolamento e a curva de referência a dividir pelas 16 bandas seja o mais aproximado possível de 2 sem nunca ultrapassar este valor. Depois de definido o parâmetro X, vai-se à frequência dos 500 Hz e retira-se o valor do nível de isolamento da curva de referência.

O valor da curva de referência ajustada para a frequência dos 500 Hz é que vai corresponder ao valor único de isolamento.

Além da curva de referência também podem ser utilizado outros espectros, conforme explicita a norma EN ISO 717-1, sendo eles o de ruído rosa e o ruído de tráfego urbano. A utilização destes outros espectros deve-se ao facto de em certos casos a curva de referência não atribuir convenientemente o tipo de isolamento existente.

Para os seguintes tipos de fontes emissoras de ruído devem ser considerados os seguintes termos de adaptação:

Quadro 2.12 – Tipos de fonte de ruído rosa e de tráfego urbano.

Tipo de fonte sonora	Termo de adaptação
Conversa; Música; Rádio; TV Brincadeiras de Criança; Fábricas emissoras de ruído com conteúdos importantes em médias e altas frequências Tráfego rodoviário em auto-estrada ($v > 80$ km/h) Tráfego ferroviário em velocidades médias e altas Tráfego aéreo a curta distância (jactos)	<p style="text-align: center;">Ruído Rosa C</p>
Discotecas Fábricas emissoras de ruído com conteúdos importantes em baixas e médias frequências Tráfego rodoviário urbano Tráfego ferroviário a baixa velocidade Tráfego aéreo (hélices)	<p style="text-align: center;">Ruído de tráfego urbano Ctr</p>

O cálculo do índice de isolamento tendo em conta estes novos termos de adaptação faz-se de forma semelhante ao da curva de referência, apenas com a diferença que neste caso os valores das curvas para cada banda de frequências são:

Quadro 2.13 – Valores da curva de referência de ruído rosa e de tráfego urbano.

Frequência	Ruído Rosa	Ruído de Tráfego Urbano
100	X-29	X-20
125	X-26	X-20
160	X-23	X-18
200	X-21	X-16
250	X-19	X-15
315	X-17	X-14
400	X-15	X-13
500	X-13	X-12
630	X-12	X-11
800	X-11	X-9
1000	X-10	X-8
1250	X-9	X-9
1600	X-9	X-10
2000	X-9	X-11
2500	X-9	X-13
3150	X-9	X-15

O valor único de cada um destes termos de adaptação calcula-se de forma igual ao da curva de referência, ou seja a soma, em módulo, das diferenças negativas divididas por 16 tem de se aproximar do valor 2, sem o ultrapassar.

A apresentação destes valores é dada pela diferença destes e o valor único da curva de referência, ou seja se se considerar:

$$R_w = 54 \text{ dB}$$

$$R_C = 52 \text{ dB}$$

$$R_{Ctr} = 49 \text{ dB}$$

$$C = R_C - R_w = 52 - 54 = -2 \text{ dB}$$

$$Ctr = R_{Ctr} - R_w = 49 - 54 = -5 \text{ dB}$$

Como a apresentação do valor único para os termos de adaptação é feito em relação à curva de referência, tem-se:

$$R_w(C; Ctr) = 54(-2; -5) \text{ dB}$$

O valor do isolamento para o $D_{n,w}$ ou $D_{2m,n,w}$ é apresentado de igual forma.

$$D_{n,w}(C;Ctr) = 54(-2;-5) \text{ dB}$$

$$D_{2m,n,w}(C;Ctr) = 54(-2;-5) \text{ dB}$$

2.3.2. Método de Previsão

O isolamento a sons aéreos de elementos planos e homogêneos depende das características do próprio elemento, como a inércia, a massa, a rigidez e o amortecimento interno dos elementos definidores da compartimentação, entre outros.

Actualmente existem vários métodos de estimação, dos quais se destaca:

- O método elásto-dinâmico;
- O método de E. Gerrelsen;
- O método de análise nodal;
- O método dos elementos finitos;
- O método de análise estatística de energia;

Estes modelos traduzem, de uma forma mais ou menos aproximada, o comportamento vibracional dos elementos de compartimentação, que podem ser muito simplistas ou muito sofisticados conforme o método escolhido.

Actualmente o método teórico mais utilizado é o elásto-dinâmico.

Este método tem origem num modelo inercial, considerando o efeito de rigidez e o amortecimento interno.

O isolamento acústico, neste modelo, pode ser controlado pela rigidez, amortecimento, massa e pelo efeito coincidência.

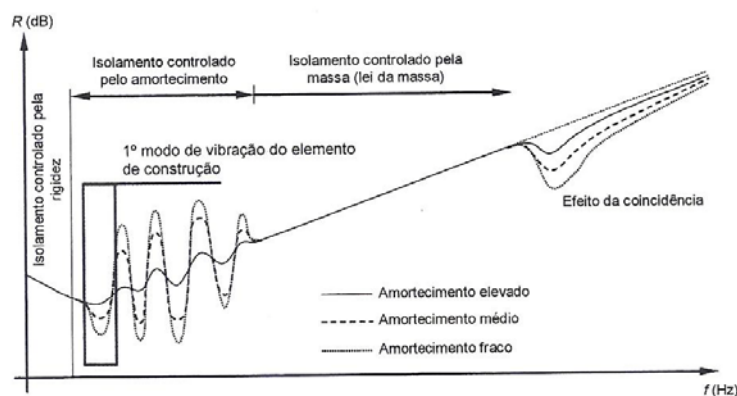


Figura 2.44 – Isolamento por frequência. [20]

Para o modelo inercial é considerada uma placa plana, com espessura constante, desligada do seu contorno e indeformável no plano que a contém; simplificada, a placa é constituída por vários elementos prismáticos sem ligação rígida entre si e com as superfícies de contacto com um atrito muito baixo, para que estas se possam movimentar livremente.

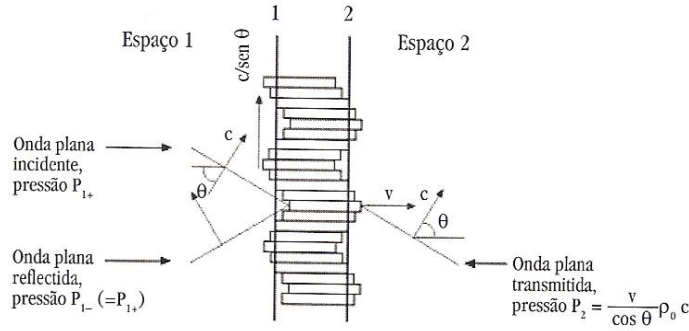


Figura 2.45 – Modelo inercial. [20]

A equação aplicada a cada elemento prismático é a seguinte:

$$p_1 - p_2 = m \frac{\partial v}{\partial t} = j m \omega v \quad (2.47)$$

onde:

- p_1 – pressão sonora total sobre o elemento no lado do compartimento emissor;
- p_2 – pressão sonora total sobre o elemento no compartimento receptor;
- v – velocidade de vibração normal de cada elemento;
- m – massa do elemento;
- j – unidade imaginária;
- ω – frequência angular de vibração;

Para um determinado ângulo de incidência das ondas sonoras, o factor de transmissão/propagação, τ_θ , é igual a:

$$\tau_\theta = \left| \frac{p_2}{p_{1+}} \right|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{m \omega \cos \theta}{2 \rho_0 c} \right)^2} \quad (2.48)$$

onde:

- ρ_0 – massa específica do ar;
- c – velocidade de propagação do som no ar;

- p_{1+} – pressão sonora incidente no elemento prismático;

A partir da expressão anterior consegue-se deduzir o factor de redução da transmissão sonora da placa, normalmente designada pela “Lei da Massa”, sendo ela:

$$R_0 = 10 \log \left(\frac{1}{\tau_\theta} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{\tau_\theta} \right) = 10 \log \left[1 + \left(\frac{m \omega \cos \theta}{2 \rho_0 c} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}] \quad (2.49)$$

Através da “Lei da Massa” consegue-se concluir que quando se duplica a massa de um elemento o isolamento desse elemento aumenta 6 dB e que o isolamento é mais eficaz para altas frequências que para baixas frequências.

Este modelo tem de ser corrigido devido ao efeito de coincidência. Este efeito irá provocar ondas de flexão com uma celeridade c_f , sendo esta igual a:

$$c_f = c \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (2.50)$$

onde:

- f_c – frequência crítica, calculada através da expressão seguinte:

$$\begin{aligned} c_L &= \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad [\text{m/s}] \\ f_c &= \frac{c^2}{2\pi h} \times \frac{\sqrt{12}}{c_L} \\ f_c &= \frac{c^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.51) \end{aligned}$$

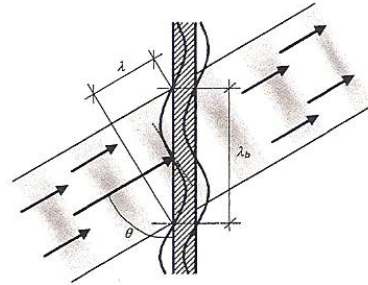


Figura 2.46 – Frequência crítica. [20]

onde:

- c_L – velocidade de propagação das ondas longitudinais;
- E – módulo de elasticidade do material;
- h – espessura do elemento;
- ν – coeficiente de poisson do elemento;

Com base nestas relações consegue-se obter o seguinte modelo de redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogêneos, simples, em função da frequência.

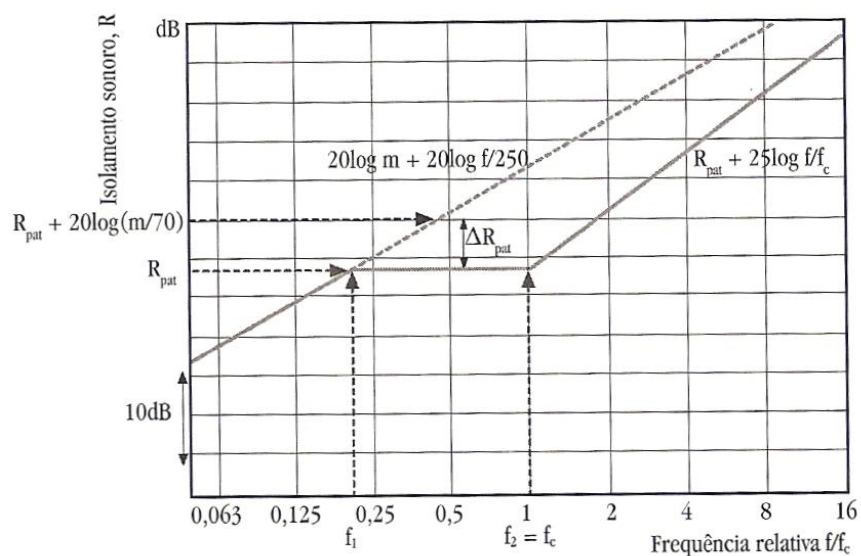


Figura 2.47 – Isolamento por frequência. [20]

Para elementos mássicos, como o tijolo e o betão, existe um ábaco e expressões que permitem deduzir o valor do isolamento sonoro a partir da massa superficial do elemento.

O ábaco é:

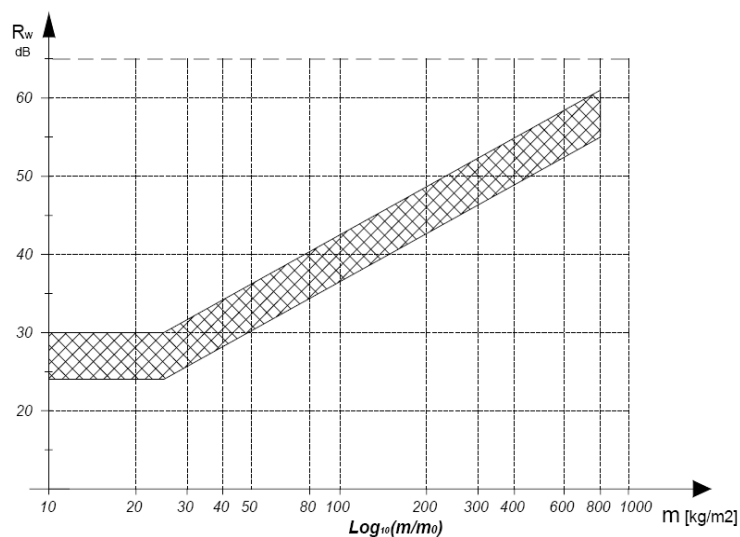


Figura 2.48 – Isolamento pela “Lei da Massa”. [11]

As expressões são:

$$R_w = 21,7 \log(m) - 2,3 \pm 1 \text{ dB} \Rightarrow 50 \leq m < 100 \text{ kg/m}^2 \quad (2.52)$$

$$R_w = 32,4 \log(m) - 26,0 \text{ dB} \Rightarrow 100 \leq m < 150 \text{ kg/m}^2 \quad (2.53)$$

$$R_w = 40,0 \log(m) - 45,0 \text{ dB} \Rightarrow m \geq 150 \text{ kg/m}^2 \quad (2.54)$$

Para a aplicação de um pano adicional pode-se recorrer ao seguinte ábaco de modo a obter o acréscimo de isolamento conferido por esse isolamento:

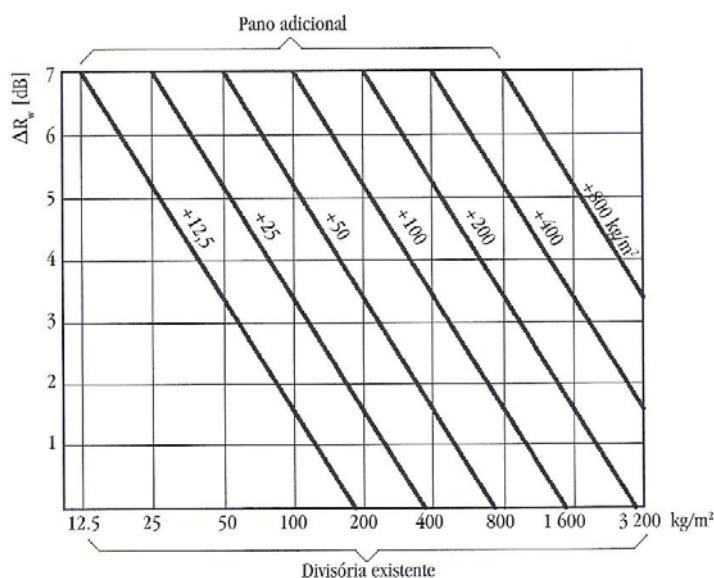


Figura 2.49 – Isolamento conferido pela colocação de um pano adicional. [20]

Na elaboração desta dissertação optou-se por recorrer a outro método de previsão, designado por Modelo Misto, que foi inicialmente elaborado por Meisser em 1978 e depois revisto por Mateus e Tadeu em 1999 [15].

O modelo misto revisto por Mateus e Tadeu permite calcular o índice de isolamento sonoro de soluções construtivas simples, quer sejam pesadas ou leves, sabendo apenas a sua massa superficial.

A expressão que permite obter o índice de isolamento para uma parede simples segundo o modelo misto é:

$$R_{500\text{Hz}} = 13,2 \times \log(m) + 13,8 \quad \text{se } m < 200 \text{ kg/m}^2 \quad (2.55)$$

$$R_{500\text{Hz}} = 14,3 \times \log(m) + 11 \quad \text{se } m \geq 200 \text{ kg/m}^2 \quad (2.56)$$

onde:

- m – massa superficial do elemento construtivo [kg/m^2];

Contudo esta expressão representa apenas o nível de isolamento para uma frequência específica, 500 Hz. De forma a obter o nível de isolamento sonoro global da solução construtiva, Mateus e Tadeu propuseram uma simplificação que permite a conversão do valor obtido para a frequência dos 500 Hz para o valor global.

A conversão proposta foi:

$$R_w \approx R_{500\text{Hz}} + 4 \text{ dB} \quad (2.57)$$

Embora este modelo permita obter um valor aproximado do isolamento sonoro de um elemento simples muitas vezes o elemento que se tem é um elemento duplo ou misto. Neste caso, esta fórmula já não permite obter o valor do seu índice de isolamento.

Com base em análises experimentais, Mateus e Tadeu verificaram que dois elementos com a mesma massa superficial, um simples e outro duplo, apresentam diferentes índices de isolamento sonoro. Logo as expressões utilizadas para elementos simples não podem ser utilizadas para elementos duplos.

Com base em análises experimentais, Mateus e Tadeu, conseguiram obter uma correcção a aplicar à lei experimental da massa de elementos simples de forma a tornar os valores obtidos por esta adequados à realidade dos elementos duplos.

A expressão adaptada para elementos duplos é:

$$R_{500\text{Hz}} = 13,2 \times \log(m) + 13,8 + \text{Dif} \quad \text{se } m < 200 \text{ kg/m}^2 \quad (2.58)$$

$$R_{500\text{Hz}} = 14,3 \times \log(m) + 11 + \text{Dif} \quad \text{se } m \geq 200 \text{ kg/m}^2 \quad (2.59)$$

onde:

- m – massa superficial de toda a solução construtiva [kg/m²];
- Dif – a diferença a somar para adaptar a expressão a elementos duplos;

Esta diferença a aplicar na expressão inicial tem três condicionalismos.

- Espessura da caixa de ar;
- Espessura de material absorvente na caixa de ar;
- Diferença entre panos;

A cada um destes condicionalismos irá corresponder uma letra, sendo o valor da diferença obtido da seguinte forma:

$$\text{Dif} = A+B-C \quad (2.60)$$

Para se obter o valor da letra A recorre-se ao Quadro 2.14.

Quadro 2.14 – Características da caixa de ar.

	dB
Caixa de ar com 1cm e panos de massas diferentes	2
Caixa de ar com 2 a 4 cm	3 a 4
Caixa de ar com 5 a 10 cm	5

Para se obter o valor da letra B recorre-se ao Quadro 2.15.

Quadro 2.15 – Características do material absorvente.

	dB
1 cm de material absorvente	1
2 a 4 cm de material absorvente	2
5 a 10 cm de material absorvente	3 a 4

Para se obter o valor da letra C recorre-se ao Quadro 2.16.

A correcção da letra C é apenas aplicada quando os panos são muito diferentes, como paredes mistas ou pavimentos com tecto falso.

Quadro 2.16 – Características dos panos.

	dB
A+B=1	2
A+B=5	3
A+B=7	4

2.3.3. Heterogeneidades

As fachadas são elementos construtivos onde mais facilmente se encontram heterogeneidades, ou seja, mais facilmente se encontra, num mesmo plano, mais do que um tipo de material ou solução construtiva. Os dois elementos que mais se utiliza nas fachadas são de dois tipos: o elemento pesado, como a parede de alvenaria de tijolo, e os elementos envidraçados; contudo também se podem encontrar outros elementos como grelhas de ventilação, caixas de estore, portas, entre outros.

Cada elemento tem um comportamento ao som totalmente distinto dos outros, não resultando o isolamento sonoro global da soma dos isolamentos conferidos por cada um deles.

O isolamento acústico conferido por um conjunto de elementos, para cada caso, é dado pela seguinte expressão:

- Paredes entre espaços fechados:

$$D_{nT,w} = R_w + 10 \log \left(\frac{V}{6,25 \times S \times T_0} \right) - \text{Transmissão Marginal} \quad (2.61)$$

- Paredes de fachada:

$$D_{2m,nT,w} = R_{w,Global} + 10 \log \left(\frac{V}{6,25 \times S \times T_0} \right) \quad (2.62)$$

onde:

- $R_{w,Global} = 10 \log \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i S_i \times 10^{(-R_{w_i}/10)}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.63);$

- S – área do elemento;
- T_0 – tempo de reverberação de referência (normalmente, 0,5 segundos excepto quando haja tempo de reverberação atribuível em projecto);
- R_w – isolamento acústico conferido pelo elemento;

Através da expressão para paredes de fachada pode-se concluir que o elemento mais fraco acusticamente é o que vai limitar o índice de isolamento acústico e por vezes é desprezável o contributo da solução mais isolante, uma vez que o som entra, preferencialmente, através do elemento mais fraco, normalmente os envidraçados. Nestas zonas mais fracas acusticamente irão ocorrer maiores transmissões sonoras o que irá dar origem a quebras no isolamento. Assim, em vez de se investir por vezes em paredes muito isolantes e desprezar-se o tipo de envidraçado utilizado, dever-se-ia cuidar a qualidade acústica dos envidraçados de forma a equilibrar o isolamento entre a parede e o envidraçado.

A análise da Figura 2.50 permite tirar algumas conclusões.

Supondo que temos uma parede de fachada, com uma área total de 6 m², composta por dois elementos distintos de áreas iguais (3 m²). Um dos elementos tem um isolamento de

30 dB, fixo, e outro um isolamento inicial de 30 dB, o qual é posteriormente aumentado de 1 em 1 dB.

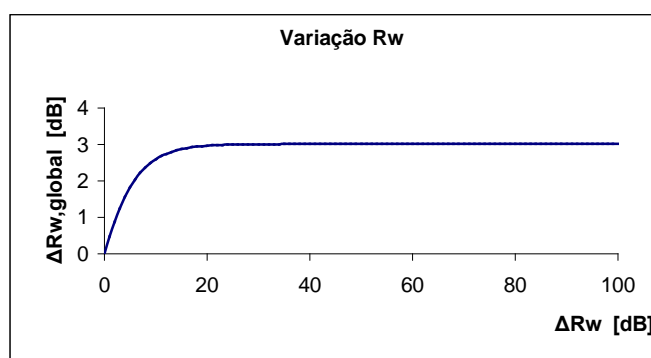


Figura 2.50 – Variação do isolamento acústico de elementos compostos.

Pode-se verificar, pela figura que após uma certa diferença entre os isolamentos acústicos de dois elementos, o mais forte pouca relevância irá ter no isolamento da parede. Neste caso seria preciso um aumento do índice de isolamento acústico do elemento mais isolante, relativamente ao menos isolante, de 2 dB para que o global aumentasse 1 dB, 5 dB para o global aumentar 2 dB, 18 dB para o global aumentar 3 dB, o que já é bastante complicado de obter, e a partir daqui por mais que se aumente o isolamento da melhor solução, nenhuma alteração irá ocorrer no isolamento acústico global.

Como conclusão, pode-se dizer que os elementos mais fracos são aqueles que requerem maior cuidado na optimização do isolamento acústico de uma parede de fachada.

O decréscimo do isolamento acústico de uma fachada com o aumento da área do elemento menos isolante não é constante. Isto é perceptível através da Figura 2.51.

Supondo que, inicialmente, se tem uma parede com uma área de 6 m² e um isolamento acústico de 47 dB, depois faz-se diminuir a área dessa parede. A percentagem de parede diminuída é compensada com um elemento cujo R_w é igual a 30dB. Calculando-se a diferença de isolamento global entre os valores de área inicial e final (ΔR_w), obtém-se o seguinte figura:

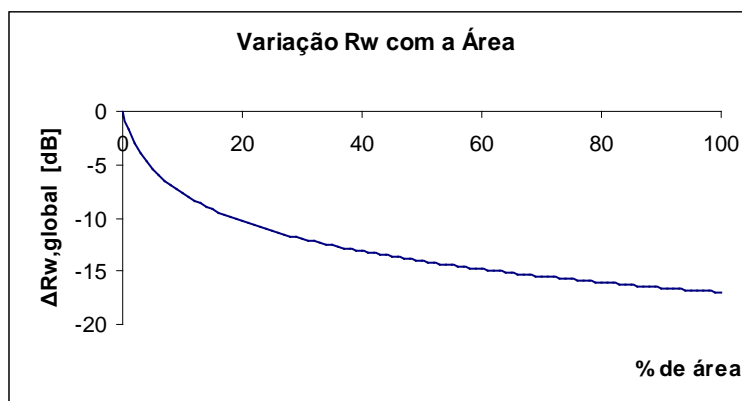


Figura 2.51 – Variação do isolamento com as áreas dos vários elementos que constituem um elemento compostos.

Pela visualização da Figura 2.51 pode-se verificar que a colocação de um elemento cujo índice de isolamento sonoro seja mais baixo relativamente ao elemento inicial, vai fazer com que o isolamento global apresente, inicialmente, logo um grande decaimento.

Desta Figura 2.51 pode-se concluir a influência que a percentagem de área do elemento menos isolante acusticamente tem no isolamento global da parede.

Como já foi referido, os elementos de fachada a que se deverá dar alguma atenção são os vãos envidraçados. Estes elementos são considerados também como compostos, uma vez que são constituídos por dois elementos diferentes, pelo vidro e pela caixilharia.

Alguns fabricantes de vidros dão os índices de isolamento apenas dos vidros sem contar com a caixilharia, contudo em projecto deve-se ter cuidado para este facto pois os índices variam bastante com a caixilharia; diminuindo o seu isolamento com o aumento da sua permeabilidade ao ar. Logo os caixilhos menos permeáveis, classe 3, e de maior massa são os mais isolantes.

A título indicativo e para que se perceba a importância das aberturas nos vãos envidraçados, supondo que se tem uma janela, cujo R é igual a 30 dB, com 2 m², considerado:

- 0,1% de área aberta o R da janela decresce 3 dB, passando para 27dB
- 1,0% de área aberta, o R da janela decresce 10dB, passando para 20dB
- 10% de área aberta, o R da janela decresce 20dB, passando para 10dB

Deste exemplo pode-se concluir que, à semelhança do isolamento de elementos compostos, não vale a pena investir num vidro muito isolante se o caixilho também não o for porque este será o elemento fraco e é aqui que se darão as quebras de isolamento.

Além dos vãos envidraçados, as paredes de alvenaria de tijolo, normalmente, também são uma boa fonte de quebras no isolamento. Estas quebras não ocorrem no próprio tijolo mas sim nas juntas, principalmente nas verticais onde não se dá a importância devida para deixar a parede totalmente estanque antes da aplicação do revestimento superficial. Este facto faz com que estas pequenas aberturas constituam pontos fracos, fazendo com que as transmissões sonoras sejam mais elevadas nestes pontos e consequentemente diminuindo o isolamento global da parede. Para minimizar este efeito é aconselhável a aplicação de reboco em ambas as faces da parede de alvenaria.

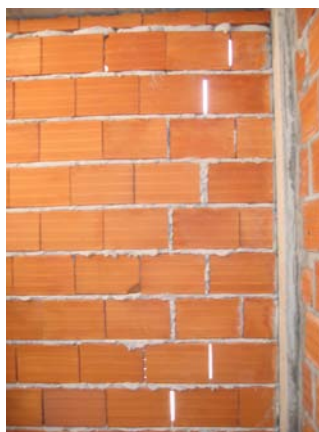


Figura 2.52 – Parede de alvenaria de tijolo bastante permeável.

De modo a facilitar a percepção da influência das aberturas no isolamento acústico, é apresentada a Figura 2.53 onde se pode ver a diminuição no isolamento da parede por percentagem de área aberta dessa mesma parede.

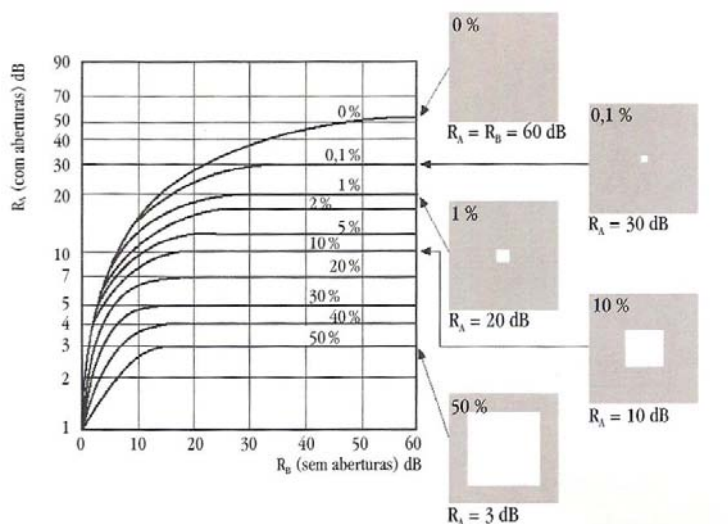


Figura 2.53 – Redução do isolamento sonoro por percentagem de abertura. [18]

2.3.4. Transmissão Marginal

Em laboratório determina-se o índice de isolamento acústico em condições ideais, onde o contacto entre os locais emissor e receptor é feito através de elementos resilientes, como já foi referido anteriormente. Como essas junções são constituídas por materiais resilientes, no local receptor apenas chega, praticamente, a energia sonora que passa directamente pelo elemento em estudo, mas em obra estas junções resilientes não existem. Estas são rígidas, permitindo a transmissão por via indirecta do som, ou seja permitindo que no local receptor chegue o som que atravessa os elementos adjacentes ao elemento em estudo. Esta transmissão de energia sonora por via indirecta designa-se de transmissão marginal.

A transmissão marginal deve ser contabilizada nos ensaios realizados em obra tanto no cálculo do isolamento sonoro a sons aéreos como a sons de percussão.

A legislação actualmente existente em Portugal apenas é dirigida à verificação de conformidade após a construção, pelo que se torna indispensável em projecto quantificar o contributo da transmissão marginal para que o índice de isolamento acústico previsto em projecto não difira muito em relação ao medido depois em obra porque esta diferença pode ser o suficiente para que a obra se encontre não conforme, obrigando a gastos adicionais.

O RRAE, contudo, ainda nos dá uma margem de segurança de 3dB, ou seja refere que os valores da medição do índice de isolamento em obra mais o factor de incerteza (3 dB) tem de ser maior ou igual ao valor de $D_{nT,w}$ ou $D_{2m,nT,w}$, conforme o isolamento que se esteja a calcular. Este factor não deve ser contabilizado em projecto porque, como o próprio nome indica, é um factor de segurança que permite eliminar alguns possíveis erros construtivos que ocorram em obra.

De forma sucinta, apresenta-se de seguida a Figura 2.54 com várias formas de transmissão de energia sonora entre dois espaços.

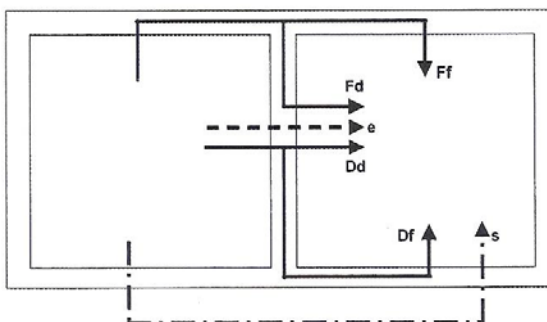


Figura 2.54 – Formas de transmissão sonora. [20]

Na Figura 2.54 pode-se verificar as seguintes formas de transmissão sonora:

- Directa (D_d) – através do elemento de separação.
- Indirecta (e ; s) – através de portas exteriores ou interiores, janelas e aberturas para ventilação.
- Marginal (F_f ; F_d ; D_f) – através das várias junções existentes.

De forma a facilitar a adaptação do índice de isolamento de elementos de compartimentação em laboratório (R_w) para o índice de isolamento sonoro verificado em obra (R'_w), alguns autores sugerem as seguintes adaptações descritas no Quadro 2.17.

Quadro 2.17 – Transmissão marginal [20].

	Transmissão Marginal
$R_w \leq 35 \text{ dB}$	0 dB
$35 < R_w \leq 45 \text{ dB}$	3 dB
$45 < R_w \leq 55 \text{ dB}$	4 dB
$R_w > 55 \text{ dB}$	5 dB

O valor de R'_w obtém-se então pela expressão: $R'_w = R_w - \text{Transmissão Marginal}$

Contudo para valores de $R_w > 55 \text{ dB}$ é aconselhado a determinação das transmissões marginais pela norma EN 12354-1.

Para as construções correntes em Portugal, alvenaria e betão armado, e para valores de R_w do elemento de separação até cerca de 45 dB, as transmissões marginais são quase desprezáveis, tendo em conta que neste caso as imperfeições construtivas são muito mais importantes [9].

Para a estimação da transmissão marginal recorre-se à norma EN ISO 12354-1.

Nesta norma quantifica-se o factor de transmissão da energia sonora total radiada para o compartimento receptor através da expressão:

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (2.64)$$

onde:

- τ' - factor de transmissão da energia sonora total radiada para o compartimento receptor;
- τ_d - factor de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor por via directa;
- τ_f - factor de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor pelos elementos marginais;
- τ_e - factor de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor por pequenos elementos onde pode ocorrer transmissão por via directa;
- τ_s - factor de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor por outras vias de transmissão indirecta;
- n – número total de elementos marginais (normalmente 4);
- m – número de pequenos elementos;

- k – numero de vias de transmissão indirecta;

A redução sonora global é dada pela expressão:

$$R' = -10\log(\tau') \quad (2.65)$$

Tendo em conta que o factor de transmissão de energia sonora radiada para o compartimento receptor é:

$$\tau = 10^{-R/10} \quad (2.66)$$

A redução sonora global dada pela transmissão directa e marginal é dada pela expressão

$$R'_w = -10\log\left(\tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f\right)$$

$$R'_w = -10\log\left(10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{i,j} 10^{\frac{-R_{ij,w}}{10}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.67)$$

onde:

$$R_{ij,w} = \frac{(R_{i,w} + R_{j,w})}{2} + K_{ij} + 10\log\left(\frac{S}{L_{ij}}\right) \quad (2.68)$$

onde:

- K_{ij} – índice de redução da transmissão de vibração para o caminho ij ;
- S – área do elemento de separação;
- L_{ij} – comprimento da união entre o elemento i e o elemento j ;

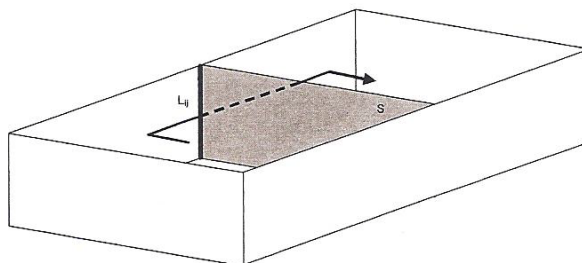


Figura 2.55 — Transmissão marginal. [20]

Tendo em consideração que o índice de relação mássica é igual a:

$$M = \log\left(\frac{m_i}{m_j}\right) \quad (2.69)$$

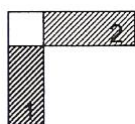
onde:

- m_i – massa superficial do elemento i no caminho de transmissão ij [kg/m^2];
- m_j – massa superficial do elemento perpendicular a i no caminho de transmissão ij [kg/m^2];

Consegue-se calcular os seguintes índices de redução da transmissão de vibração.

Ligações Rígidas [20]:

Ângulos:



$$K_{12} = 15|M| - 3 = K_{21}$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

Mudanças de Espessura:

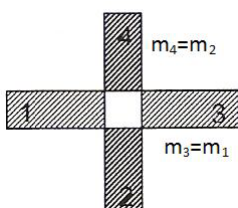


$$K_{12} = 5M^2 - 5 = K_{21}$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

Cruz:



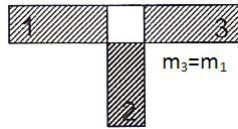
$$K_{13} = 8,7 + 17,1 \times M + 5,7 \times M^2$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 \times M^2 = K_{23}$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

T:



$$K_{13} = 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \times M^2$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

Ligações com Camadas Resilientes:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 + 2\Delta_1$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \times M^2 + \Delta_1 = K_{23}$$

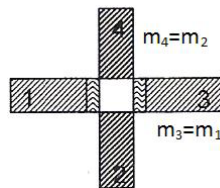
$$-4 \leq (K_{24} = 3,7 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2) \leq 0\text{dB}$$

em que:

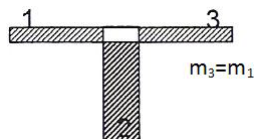
$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

$$\Delta_1 = 10 \log\left(\frac{f}{f_1}\right) \text{ com } f > f_1$$

$$f_1 = 125 \text{ Hz se } \frac{E_1}{t_1} \approx 100\text{MN/m}^3$$



Ligação de Fachadas Ligeiras:



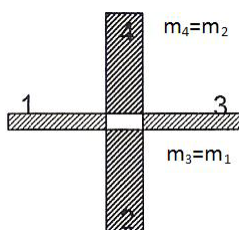
$$K_{13} = 5 + 10 \times M$$

$$K_{12} = 10 + 10 \times |M| = K_{23}$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

Ligação de Paredes Duplas Ligeiras e Elementos homogêneos:



$$K_{13} = 10 + 20 \times M - 3,3 \times \log \left(\frac{f}{f_k} \right)$$

$$K_{24} = 3 + 14,1 \times M + 5,7 \times M^2 ; \quad \frac{m_2}{m_1} > 3$$

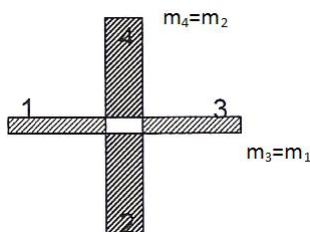
$$K_{12} = 10 + 10 \times |M| + 3,3 \times \log \left(\frac{f}{f_k} \right) = K_{23}$$

em que:

$$M = \log \left(\frac{m_2}{m_1} \right)$$

$$f_k = 500 \text{ Hz}$$

Ligação de Paredes Duplas e Ligeiras Acopladas:



$$K_{13} = 10 + 20 \times M - 3,3 \times \log \left(\frac{f}{f_k} \right)$$

$$K_{12} = 10 + 10 \times |M| + 3,3 \times \log \left(\frac{f}{f_k} \right) = K_{23}$$

em que:

$$M = \log \left(\frac{m_2}{m_1} \right)$$

$$f_k = 500 \text{ Hz}$$

2.4. Propagação Sonora por Via Sólida de Sons de Percussão

Um som pode ter origem numa excitação provocada nas moléculas de ar, que fazem variar a pressão sonora atmosférica produzindo som, designado som aéreo, ou pode ter origem numa excitação, choque, provocada directamente sobre um elemento, designado som de percussão.

Os sons de percussão são sons que resultam do choque com um elemento rígido. Estes podem ser ouvidos a alguma distância do choque, dependendo a distância do tipo de

material que recebe o choque e dos tipos materiais que este vai percorrer, devido às ligações rígidas existentes entre os vários elementos definidores do espaço.

O choque pode ter várias origens mas normalmente está associado à deslocação de pessoas, ao arrastar de mobiliário, ao cair de objectos, ou seja a acções que provoquem uma excitação num elemento de compartimentação que depois se propaga por ondas elásticas a todo esse elemento e, caso haja juntas rígidas, aos elementos adjacentes.

O facto de, quando existe ligações rígidas entre os elementos, este tipo de som poder ser audível a maiores distâncias da fonte que o aéreo, permite classificá-lo como mais incomodativo.

Na Figura 2.56 são apresentados dois tipos de sons, um de percussão e outro aéreo, e o respectivo incómodo provocado por cada um deles

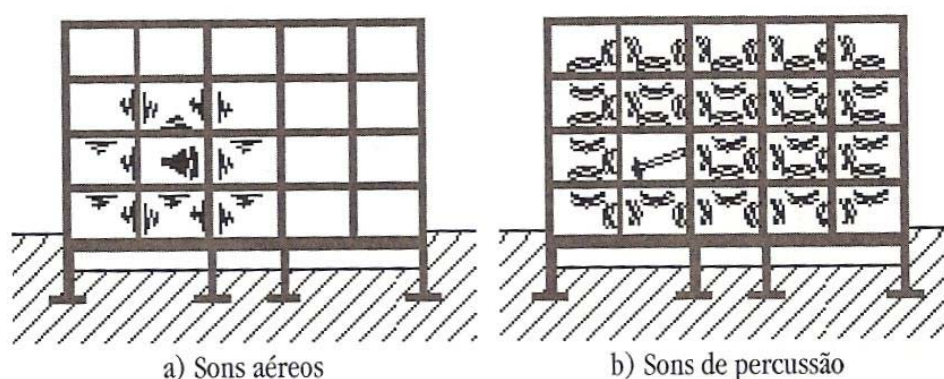


Figura 2.56 — Tipos de sons. [18]

Para atenuar o efeito da propagação das ondas elásticas provocadas pelo choque é conveniente a duplicação do elemento separado por uma caixa-de-ar ou a colocação de material flexível que absorva parte das ondas entre os elementos rígidos ou sobre o elemento onde é provocado o choque.

A quantificação do isolamento a sons de percussão, à semelhança do isolamento a sons aéreos, pode ser feita segundo o método experimental ou através do método de previsão.

No método experimental estão incluídas as medições *in situ* e em laboratório. O método de previsão é utilizado em fase de projecto para, como o próprio nome indica, fazer uma previsão do isolamento obtido para uma determinada solução.

As medições em laboratório devem ser executadas com base na norma EN ISO 140-6:1998 e as feitas *in situ* segunda a norma EN ISO 140-7:1998. No método *in situ* a metodologia e a dificuldade é igual quer se trate do cálculo da transmissão sonora de cima para baixo quer se trate da transmissão lateral, entre compartimentos do mesmo piso, ou o inverso, de baixo para cima.

As medições em laboratório são realizadas com a aplicação do elemento em ensaio sobre uma sala isolada por elementos resilientes em todo o seu contorno. Sobre o tecto dessa sala é colocado o elemento em análise e sobre este elemento uma máquina de percussão. Finalmente é colocado um microfone no interior da sala e, com a máquina de percussão a trabalhar, mede-se o nível sonoro no interior da sala.

A Figura 2.57 que exemplifica a medição em laboratório.

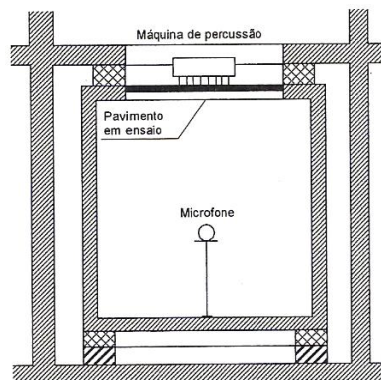


Figura 2.57 — Laboratório de percussão. [20]

In situ, o método utilizado é parecido ao laboratorial. O método consiste em colocar um sonómetro na sala onde se quer registar o nível de ruído e colocar no piso sobre esta uma máquina de percussão a funcionar.

O nível de pressão sonora médio medido na sala receptora é igual a:

- Em laboratório:

$$L_n = 10 \log \left(\frac{p_{\text{receptor}}^2}{p_0^2} \times \frac{A_{\text{receptor}}}{A_0} \right) = L_p + 10 \log \left(\frac{A_{\text{receptor}}}{A_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.70)$$

onde:

- L_p – nível médio de pressão sonora na sala receptora, tendo este de ser superior à pressão sonora do ruído de fundo mais 10 dB;
- A_0 – valor de referência da área de absorção sonora nas salas de dimensões correntes em edifícios de habitação, 10 m²;
- A_{receptor} – área de absorção sonora do local receptor;

- *In situ*:

$$L'_{n,T} = L' - 10 \log \left(\frac{T_R}{T_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.71)$$

onde:

- L' – nível de pressão sonora médio medido na sala receptora;

- T_0 – Tempo de reverberação de referência, geralmente, igual a 0,5 s;
- T_R – tempo de reverberação da sala receptora

$$T_R = \frac{0,161 \times V}{A_{\text{receptor}}} \quad [\text{s}] \quad (2.16)$$

Logo:

$$L'_{n,T} = L'_n - 10 \log(0,032 \times V) \quad [\text{dB}] \quad (2.72)$$

O cálculo do nível médio de pressão sonora é feito em bandas de 1/3 de oitava, normalmente entre as frequências centrais de 100 Hz e 3.150 Hz.

Após obter-se o valor em 1/3 de oitava dos índices $L'_{n,T}$ ou L'_n , conforme seja feito *in situ* ou laboratório, respectivamente, obtém-se o valor único do índice pelo ajustamento daqueles a uma curva de referência, de acordo com a norma EN ISO 717-2.

O cálculo do valor único do índice é semelhante ao executado para os sons aéreos; contudo, neste caso, o que nos interessa somar são as diferenças negativas entre a curva de referência e os valores obtidos experimentalmente. A curva é ajustada até se obter um valor para as diferenças a dividir pelas 16 bandas de terço de oitava próximo do valor 2 dB mas sem nunca o ultrapassar.

A curva de referência para sons de percussão é a seguinte:

Quadro 2.18 – Curva de referência para sons de percussão.

Frequência (Hz)	Curva de Referência [dB(A)]
100	62
125	62
160	62
200	62
250	62
315	62
400	61
500	60
630	59
800	58
1000	57

Frequência (Hz)	Curva de Referência [dB(A)]
1250	54
1600	51
2000	48
2500	45
3150	42

Para facilitar o ajustamento da curva de referência à da transmissão, calcula-se a diferença entre o ponto de 100 Hz e os restantes, servindo depois este ponto como referência para os restantes.

Quadro 2.19 – Curva de referência para sons de percussão.

Frequência (Hz)	Curva de Referência [dB(A)]
100	X
125	X
160	X
200	X
250	X
315	X
400	X-1
500	X-2
630	X-3
800	X-4
1000	X-5
1250	X-8
1600	X-11
2000	X-14
2500	X-17
3150	X-20

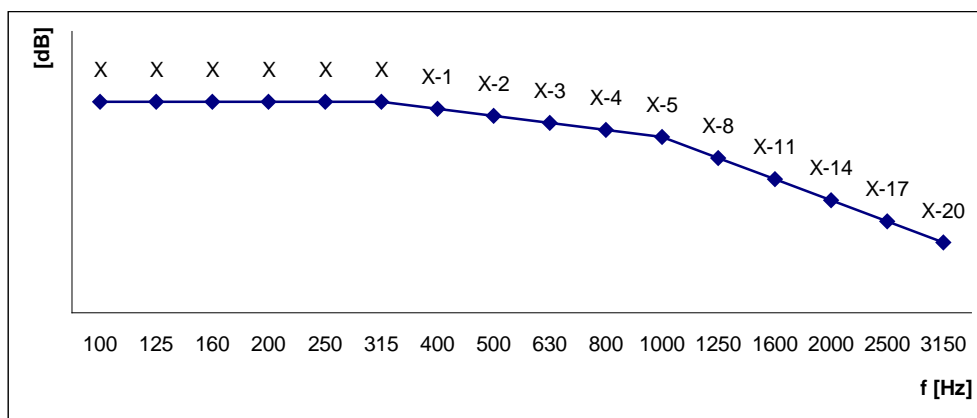


Figura 2.58 – Curva de referência para sons de percussão.

O valor único do índice de isolamento sonoro corresponde ao valor da curva de referência ajustada da frequência dos 500 Hz.

Em fase de projecto podem ser utilizados, segundo a norma EN 1254-2, dois tipos de modelo de cálculo: o modelo detalhado e o modelo simplificado, para o cálculo do parâmetro $L'_{nT,w}$.

O modelo detalhado, como próprio nome indica, é um modelo, mais complexo e mais rigoroso que permite o cálculo da transmissão a sons de percussão por via directa, de cima para baixo, ou por via lateral, desde a laje de piso percutida até aos compartimentos laterais, do mesmo piso ou do piso inferior.

O modelo simplificado é um modelo muito mais simples de ser aplicado, tendo contudo a desvantagem de apenas permitir o cálculo da transmissão por percussão por via directa, ou seja de cima para baixo.

O índice de isolamento sonoro a sons de percussão, pelo método simplificado, é igual a:

$$L'_{nT,w} = 164 - 35\log(m) - \Delta L_w + K - 10\log\left(\frac{0,016 \times V}{T_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.73)$$

onde:

- m – massa superficial do pavimento (kg/m^2);
- ΔL_w – índice de redução sonora devido à existência de revestimento de piso;
- K – correcção devido à ocorrência de transmissão marginal;
- V – volume do compartimento receptor;
- T_0 – tempo de reverberação de referência;

O índice de redução sonora devido à existência de revestimento de piso, ΔL_w , toma um valor próximo de zero para pavimentos rígidos directamente ligados à laje de suporte e um valor próximo de 20 dB para pavimentos flutuantes ou de revestimentos flexíveis.

No quadro seguinte são apresentadas algumas reduções globais na transmissão de ruídos de percussão com laje flutuante.

Quadro 2.20 – Reduções globais na transmissão de ruídos de percussão com laje flutuante.

[11]

Designação		Características	ΔL_w [dB]
Revestimentos de piso flexíveis	Alcatifa	Com cerca de 3 mm de espessura	17
		Com cerca de 5 mm de espessura	18
		Com cerca de 8 mm de espessura	23
		Com cerca de 8 mm sobre base de espuma	30
Pavimentos flutuantes	Vínilico de base flexível	Cerca de 2 mm de camada de desgaste sobre membrana de polietileno reticulado com cerca de 1 mm	15
	Cortiça	Aglomerado de cortiça com cerca de 5mm de espessura	15
	Madeira+ borracha	Pavimento de madeira colado a manta resiliente em aglomerado de borracha com 4,5 mm de espessura	21
Pavimentos flutuantes	Cerâmicos + cortiça	Ladrilhos cerâmicos (7mm) + aglomerado de cortiça 6 mm	14
	Mármore + cortiça	Placas de mármore (20 mm) + aglomerado de cortiça 6mm	14
	Parquet flutuante	Parquet de madeira + membrana de polietileno reticulado de 3 mm	18
Lajeta de betão		Lajeta de betão armado com cerca de 4 cm sobre membrana de polietileno reticulado (de célula fechada) com 5 mm de espessura	19
		Lajeta de betão armado com cerca de 4 cm sobre membrana de polietileno reticulado (de célula fechada) com 10 mm de espessura	21

Designação	Características	ΔL_w [dB]
	Lajeta de betão armado com cerca de 4 cm sobre manta resiliente em aglomerado de borracha com 4,5 mm de espessura	22
	Lajeta de betão armado com cerca de 4 cm sobre manta resiliente em aglomerado de borracha com 8 mm de espessura	24
	Lajeta de betão armado com cerca de 4 cm sobre manta resiliente em aglomerado de borracha com 15 mm de espessura	27

O valor da correcção devido à ocorrência de transmissão marginal é retirado directamente do Quadro 2.21, existente na norma EN 12354-2.

Quadro 2.21 – Valores da correcção devido à ocorrência de transmissão marginal. [N.2]

Massa superficial do pavimento [kg/m ²]	Massa superficial média dos elementos marginais (paredes), homogéneos e não revestidos [kg/m ²]								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	5	4	4	3	2	2	2	1	1
900	5	5	4	3	3	2	2	2	2

Segundo alguns autores, o método de cálculo do índice de isolamento sonoro a sons de percussão, para o tipo de construção existente no nosso país, conduz a um valor cerca de 5

dB inferior ao obtido experimentalmente; deste modo, em vez da equação existente na norma deverá ser usada a seguinte [9]:

$$L'_{nT,w} = 169 - 35\log(m) - \Delta Lw + K - 10\log\left(\frac{0,016 \times V}{T_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.74)$$

A normalização actualmente em vigor não prevê as transmissões de baixo para cima e os modelos de cálculo existentes são demasiado complexos e, por vezes, estão longe de representar a realidade. A transmissão lateral já é incluída na norma EN 12354-2 no modelo detalhado, contudo a previsão torna-se muito difícil de aplicar em projecto.

Para situações onde não se justifique o cálculo das transmissões pelo modelo detalhado, foi possível definir, com base em resultados experimentais, valores mais próximos da realidade e fáceis de obter, sendo estes algo desfavoráveis, pelo que nos permite estar do lado da segurança.

As situações e os valores a tomar são os seguintes [9]:

- “Situação em que a laje percutida é térrea, betonada sobre o solo e/ou camada base compactados, com revestimento rígido directamente ligado à laje, a transmissão é fortemente atenuada, resultando normalmente valores de $L'_{nT,w}$ muito inferiores a 50 dB, quer na transmissão de baixo para cima, quer na transmissão lateral. Refira-se, no entanto, que neste caso a dispersão de resultados experimentais é geralmente elevada, pois depende, entre outras variáveis, da localização das fundações do edifício e das características da laje e/ou do enrocamento.”
- “Para lajes não térreas e com revestimento rígido directamente ligado à laje (revestimento cerâmico ou em pedra rigidamente ligado à laje de suporte), os resultados das medições conduzem, em geral, aos seguintes intervalos de valores:
 - Na transmissão de baixo para cima, o valor de $L'_{nT,w}$ situa-se entre o valor previsto de cima para baixo reduzido de 17 a 25 dB;
 - Na transmissão lateral, entre dois compartimentos adjacentes do mesmo piso, o valor de $L'_{nT,w}$ situa-se entre o valor previsto de cima para baixo reduzido de 7 a 15 dB;”

Caso não se queira ou não se possa recorrer ao método simplificado, existem actualmente no mercado programas de cálculo automático com metodologias próximas ou iguais à da norma EN 12354-2.

Nesta dissertação a expressão utilizada na previsão do índice de isolamento a sons de percussão teve por base a da norma EN 12354-2 adaptada para o tipo de construção existente em Portugal.

Como nesta dissertação não se tem como objectivo projectar nenhuma habitação específica, não se tem valores de volumes, de tempos de reverberação e não se conhecem o tipo de elementos marginais que irão ser aplicados. Logo não se incluirá na expressão os parâmetros que dependem destas informações, contudo uma vez que o objectivo da dissertação é comparar soluções construtivas, estes parâmetros não tem influência nesta comparação.

A expressão proposta com base na norma EN 12354-2 e adaptada ao caso Português é a 2.74.

A expressão utilizada nos cálculos desta dissertação é:

$$L'_{nT,w} = 169 - 35\log(m) \quad [\text{dB}] \quad (2.75)$$

2.5. Equipamento de Medição

In situ são utilizados vários tipos de equipamentos, conforme o tipo de isolamento que se esteja a medir.

Para a medição do isolamento a sons aéreos são utilizados os seguintes equipamentos:

- Sonómetro – aparelho que permite a medição do isolamento acústico.



Figura 2.59 – Sonómetro. [W.6]

- Calibrador – permite a calibração do sonómetro.



Figura 2.60 – Calibrador. [W.6]

- Fonte omnidireccional com o amplificador – permite a criação de ruído.



Figura 2.61 – Amplificador e fonte omnidireccional. [W.6]

Para a medição do isolamento a sons de percussão, além dos equipamentos já referidos, é também utilizado o seguinte equipamento:

- Máquina de percussão – permite a execução da percussão do local onde se encontra.



Figura 2.62 – Máquina de percussão. [W.6]

2.6. Requisitos Regulamentares

O regulamento de requisitos acústicos dos edifícios (RRAE) foi inicialmente aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 e foi mais recentemente alterado pelo Decreto-Lei nº 96/2008.

Esta é, actualmente, a legislação que se aplica à construção, reconstrução, ampliação e alteração dos edifícios habitacionais e mistos.

Segundo o Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de Janeiro (Regulamento Geral do Ruído) existem quatro tipos de ruído, dois tipos de actividades ruidosas, três períodos de referência e três tipos de zonas. Para facilitar o entendimento serão transcritos, de seguida, as definições existentes no Decreto-Lei.

Ruído:

«Ruído de vizinhança» o ruído associado ao uso habitacional e às actividades que lhe são inerentes, produzido directamente por alguém ou por intermédio de outrem, por coisa à sua guarda ou animal colocado sob a sua responsabilidade, que, pela sua duração, repetição ou intensidade, seja susceptível de afectar a saúde pública ou a tranquilidade da vizinhança;

«Ruído ambiente» o ruído global observado numa dada circunstância num determinado instante, devido ao conjunto das fontes sonoras que fazem parte da vizinhança próxima ou longínqua do local considerado;

«Ruído particular» o componente do ruído ambiente que pode ser especificamente identificada por meios acústicos e atribuída a uma determinada fonte sonora;

«Ruído residual» o ruído ambiente a que se suprimem um ou mais ruídos particulares, para uma situação determinada;

Actividade Ruidosa:

«Actividade ruidosa permanente» a actividade desenvolvida com carácter permanente, ainda que sazonal, que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em locais onde se fazem sentir os efeitos dessa fonte de ruído, designadamente laboração de estabelecimentos industriais, comerciais e de serviços.

«Actividade ruidosa temporária» a actividade que, não constituindo um acto isolado, tenha carácter não permanente e que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou

permaneça em locais onde se fazem sentir os efeitos dessa fonte de ruído tais como obras de construção civil, competições desportivas, espectáculos, festas ou outros divertimentos, feiras e mercados.

Período:

«Período de referência» o intervalo de tempo a que se refere um indicador de ruído, de modo a abranger as actividades humanas típicas, delimitado nos seguintes termos:

- i) Período diurno — das 7 às 20 horas;
- ii) Período do entardecer — das 20 às 23 horas;
- iii) Período nocturno — das 23 às 7 horas;

Zona:

«Zona mista» a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afectada a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível;

«Zona sensível» a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período nocturno;

«Zona urbana consolidada» a zona sensível ou mista com ocupação estável em termos de edificação.

Para os edifícios habitacionais e mistos, que serão tema desta dissertação de mestrado, o RRAE define os seguintes requisitos acústicos a ser cumpridos:

Quadro 2.22 – RRAE aplicável a edifícios habitacionais e mistos.

Índice	Local	Mínimo Regulamentar
$D_{2m,nt,w}$	Entre o exterior e quartos ou zonas de estar.	<p>i) $D_{2m,nt,w} \geq 33$ dB – zonas mistas ou em zonas sensíveis reguladas pelas alíneas c), d) e e) do nº1 do artigo 11º do RGR;</p> <p>ii) $D_{2m,nt,w} \geq 28$ dB – zonas sensíveis reguladas pela alínea b) do nº1 do artigo 11º do RGR;</p> <p>iii) $D_{2m,nt,w}$ das alíneas i) e ii) são acrescidos de 3 dB, quando se verifica o disposto nº 7 do artigo 12º do RGR;</p> <p>iv) Quando a área translúcida é superior a 60% do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nt,w}$ o termo de adaptação apropriado, C ou C_{tr}, conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo os limites das subalíneas i) e ii);</p>
$D_{nT,w}$	Entre compartimentos de um fogo e quartos ou zonas de estar de outro fogo.	$D_{nT,w} \geq 50$ dB;
$D_{nT,w}$	Entre locais de circulação comum do edifício e quartos ou zonas de estar entre fogos.	<p>i) $D_{nT,w} \geq 48$ dB;</p> <p>ii) $D_{nT,w} \geq 40$ dB – local emissor é um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido de ascensores;</p> <p>iii) $D_{nT,w} \geq 50$ dB – local emissor é uma garagem de estacionamento automóvel;</p>

	Entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão e quartos ou zonas de estar dos fogos.	$D_{nT,w} \geq 58 \text{ dB};$
$L'_{nT,w}$	Entre o interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos e os pavimentos dos outros fogos ou de locais de circulação comum, excepto se o local emissor for um caminho vertical, quando o edifício seja servido de ascensores.	$L'_{nT,w} \leq 60 \text{ dB};$
	Entre o interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos e os pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão.	$L'_{nT,w} \leq 50 \text{ dB};$
$L_{Ar,nT}$	No interior dos quartos e zonas de estar.	$L_{Ar,nT} \leq 32 \text{ dB(A)}$ – funcionamento intermitente do equipamento; $L_{Ar,nT} \leq 27 \text{ dB(A)}$ – funcionamento contínuo do equipamento; $L_{Ar,nT} \leq 40 \text{ dB(A)}$ – gerador eléctrico de emergência;

Nas avaliações *in situ* o RRAE dá um factor de incerteza de 3 dB para todos os índices, ou seja as medições *in situ* dos sons aéreos acrescidos de, no máximo, 3 dB têm de cumprir os requisitos regulamentares e as medições *in situ* dos sons de percussão diminuídos, no máximo, de 3 dB têm de cumprir, igualmente, os requisitos regulamentares.

Esquemáticamente, é apresentada a seguir a Figura 2.63 que demonstra a legislação a cumprir, segundo o RRAE, nos edifícios de habitacionais e mistos.

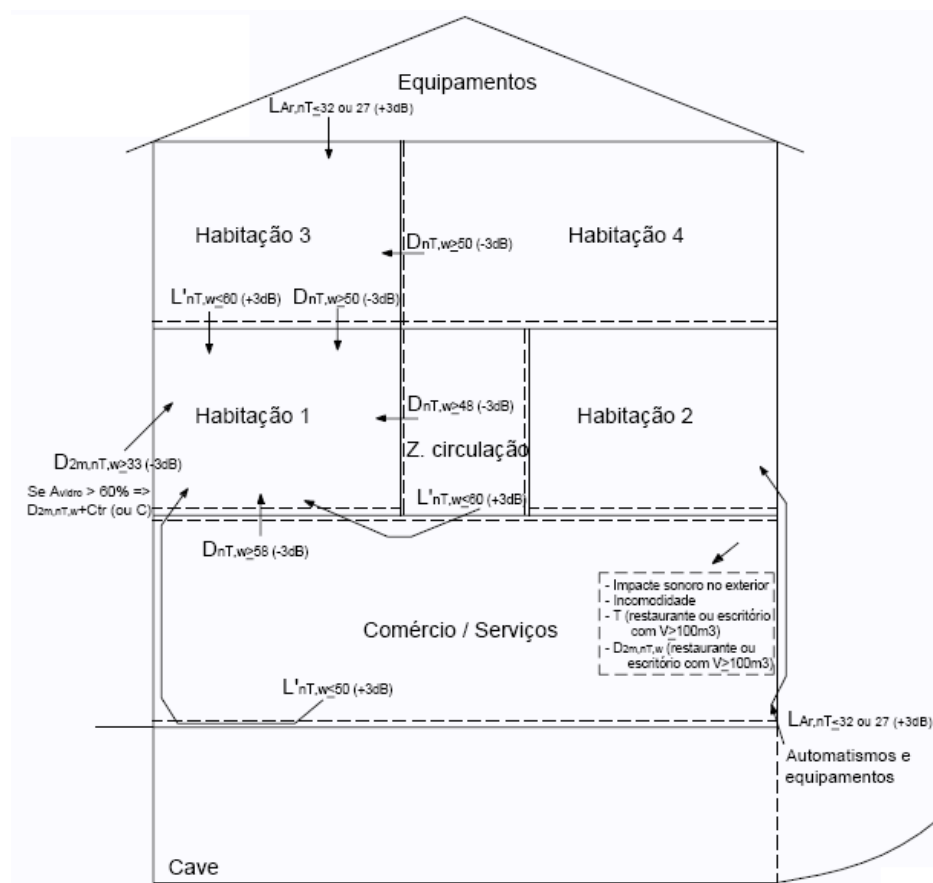


Figura 2.63 — RRAE aplicável a edifícios habitacionais e mistos. [9]

2.7. Exemplos Construtivos

Em Portugal, os edifícios existentes e os que estão a ser construídos actualmente recorrem a vários tipos de construção, umas à base de elementos leves e outras à base de elementos pesados, principalmente as mais antigas.

Para que se consiga fazer a comparação entre o tipo de isolamento conferido por cada tipo de solução construtiva são apresentadas no Quadro 2.23 quais as soluções construtivas que conferem um determinado índice de isolamento sonoro.

Quadro 2.23 – Isolamento acústico de algumas soluções construtivas. [9] [11] [18]

Índice de Isolamento Sonoro, R_w [dB]	Solução Construtiva
37	<ul style="list-style-type: none"> - Placa de gesso cartonado (13 mm) em cada lado de um perfil metálico (espessura total de 74 mm); - Alvenaria de tijolo 7 cm com reboco;
41	<ul style="list-style-type: none"> - Placa de gesso cartonado (13 mm) em cada lado de um perfil metálico de 48 mm com uma manta de lã mineral no seu interior; - Bloco de gesso de 100 mm (massa volúmica 70 kg/m²); - Alvenaria de tijolo 11 cm com reboco;
44	<ul style="list-style-type: none"> - 2 Placas de gesso cartonado (13 mm) em cada lado de um perfil metálico de 48 mm com lã mineral no seu interior; - Bloco de 100 mm (massa volúmica 140 kg/m²) com reboco; - Alvenaria de tijolo 15 cm com reboco;
49	<ul style="list-style-type: none"> - 2 Placas de gesso cartonado (13 mm) em cada lado de um perfil metálico de 120 mm com lã mineral no seu interior; - Bloco de 150 mm (massa volúmica 315 kg/m²) com reboco; - Alvenaria de tijolo 22 cm com reboco;
54	<ul style="list-style-type: none"> - 2 Placas de gesso cartonado (13 mm) num lado de dois perfis metálico de 48 mm ligados e com lã mineral no seu interior; - Dois panos de alvenaria de tijolo 15 cm com reboco separados por uma lã mineral de 4 cm

3. Comportamento Térmico

3.1. Introdução

Neste capítulo é descrito a evolução existente nos regulamentos até ao aparecimento do actual regulamento das características de comportamento térmico de edifícios (RCCTE).

Além da evolução ao longo dos regulamentos, neste capítulo encontra-se exposto e explicado algumas considerações teóricas existentes no RCCTE, que são fundamentais no âmbito desta dissertação.

3.2. Directiva Europeia 2002/91/CE

Na construção de edifícios, de serviços ou habitacionais, as preocupações de sustentabilidade, energia, durabilidade e conforto têm ganho, com o tempo, maior relevância.

A preocupação com o conforto no interior das habitações tem crescido com o passar dos anos. Este facto pode ser facilmente constatado com a construção típica que existia há uns anos atrás e a que existe hoje em dia. Como exemplo tem-se o facto de antigamente não existirem vidros duplos nos vãos envidraçados, isolamento térmico no interior das caixas-de-ar, entre outros aspectos construtivos que foram alterados com o passar do tempo de forma a ir ao encontro de uma melhoria do conforto interior das habitações.

Este aumento de preocupação do conforto interior das habitações, combinado com o facto de o consumo de energia no sector dos edifícios na Europa, entre 1997 e 2004, ter crescido cerca de 7% ao ano, com a assinatura do protocolo de Quioto por parte da Europa (onde se assumiu o compromisso de reduzir as emissões de gases poluentes que provocam o efeito de estufa) e com a previsão de que se nada fosse feito até 2020, a Europa importaria 80% da energia que consume (com as inerentes preocupações de segurança) deu origem à 2002/91/CE que impõe aos estados membros da união europeia a emissão de certificados energéticos em casos específicos.

Os casos que a directiva 2002/91/CE impõe a emissão de certificados são:

- na emissão da licença de utilização de edifícios novos;
- na reabilitação importante (25% do custo do edifício) de um edifício existente;

- no aluguer ou venda de edifícios de habitação e de serviços existentes (certificado com uma validade máxima de 10 anos);
- em edifícios públicos (de serviços) com mais de 1.000m² (certificado com uma periodicidade de emissão de 6 anos);

3.3. RCCTE

Em Portugal, como resposta à directiva europeia 2002/91/CE, surge, em Abril de 2006, três novos Decretos Lei. Os novos Decretos Lei são os nº: 78/2006, 79/2006 e o 80/2006.

O Decreto Lei 78/2006 regula o sistema nacional de certificação energética e da qualidade do ar interior nos edifícios, designado por SCE. O Decreto Lei 79/2006 regula o comportamento térmico e o desempenho energético dos grandes edifícios de serviços, comumente designado por: regulamento dos sistemas energéticos e de climatização nos edifícios (RSECE). Por fim, para edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços surge o novo regulamento das características de comportamento térmico de edifícios (Decreto Lei nº 80/2006 de 4 de Abril), comumente designado por RCCTE, que obriga a emissão de certificados energéticos nos casos previstos pela directiva 2002/91/CE.

O RCCTE permite a quantificação das necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento e para a produção de águas quentes sanitárias, assim como as necessidades de energia primária.

A certificação energética surge então com os seguintes objectivos:

- Informar o locatário, proprietário ou utente de um edifício sobre as suas características térmicas. Características essas que influenciam os seus custos de funcionamento;
- Permitir a selecção de edifícios pela sua eficiência energética, pressionando os promotores a adoptarem construções mais eficientes;
- Informar e sensibilizar os utentes de edifícios públicos, com mais de 1.000m², sobre a eficiência do edifício de forma a promover a sua reabilitação, caso a eficiência seja baixa;
- Aumentar a eficiência energética dos edifícios de forma a diminuir a dependência energética externa da EU e contribuir para o cumprimento do protocolo de Quioto;

Contudo, antes do DL nº 80/2006 já tinha sido implementado, mais especificamente em 1990, um regulamento das características de comportamento térmico de edifícios.

Este RCCTE de 1990 tinha uma metodologia de cálculo muito semelhante à que hoje em dia existe no RCCTE. Ela incluía requisitos mínimos de qualidade térmica, verificações

automáticas e um método geral de verificação. Embora a metodologia de cálculo fosse bastante semelhante, esta sofreu algumas modificações importantes.

As modificações mais importantes entre os dois RCCTE's, de 1990 e 2006, foram:

- O nível de exigência, que quase duplicou em alguns pontos, como foi o caso do coeficiente de transmissão térmica de referência, U_{ref} , para zonas opacas verticais, na zona climática I2, que passou de $1,2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para $0,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;
- Uma nova forma de cálculo para as pontes térmicas planas e a inclusão de pontes térmicas lineares;
- As perdas térmicas pelo solo deixaram de ser desprezadas, tornando desaconselhado o contacto da laje com o solo;
- As formas de cálculo das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento são obtidas por um método diferente;
- Inclui o cálculo dos gastos energéticos em águas quentes sanitárias (AQS), parcela energética com grande significado nos consumos globais;
- A colocação de colectores solares térmicos passa a ser obrigatório;
- A consideração das necessidades globais de energia primária;

Pode-se concluir que a metodologia de cálculo de 1990 para 2006 foi “refinada”, ou seja é mais detalhada, pormenorizada.

3.3.1. Dados Climáticos

Os dados climáticos dividem o país em 3 zonas climáticas diferentes, quer no Verão, quer no Inverno. Estas zonas climáticas diferem no Verão e no Inverno, como pode ser verificado na Figura 3.1 e Figura 3.2.

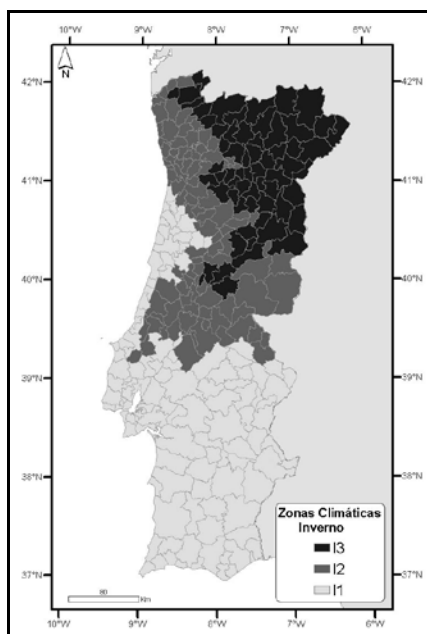


Figura 3.1 — Zonas Climáticas de Inverno. [N.10]

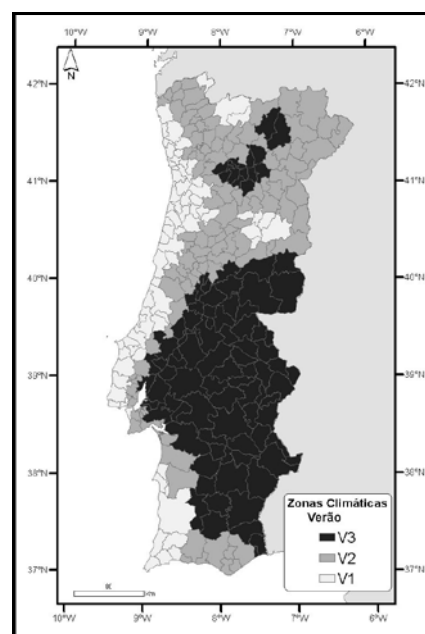


Figura 3.2 — Zonas Climáticas de Verão. [N.10]

Além das condições climáticas exteriores, o regulamento também considera as condições interiores de conforto, correspondendo estas a: 20°C no Inverno e 25°C e 50% de humidade relativa no Verão.

3.3.2. Coeficiente de Transmissão Térmica

Na aplicação do RCCTE é necessário efectuar o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U. Este permite, posteriormente quantificar as perdas pela envolvente opaca e pelos envidraçados.

O coeficiente de transmissão térmica quantifica a maior ou menor facilidade com que um elemento da envolvente se deixa atravessar pelo calor, ou seja um coeficiente alto significa que há muito calor a conseguir atravessar esse elemento construtivo e um coeficiente baixo significa exactamente o contrário, que isola bem e por isso há pouca quantidade de calor a atravessar esse elemento construtivo. Por esta razão é que os isolamentos térmicos têm um coeficiente baixo comparado com os demais materiais de construção.

Para o cálculo deste coeficiente é necessário saber as resistências térmicas de todos os materiais que constituem o elemento.

A resistência térmica de cada material calcula-se através da seguinte expressão:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [W / m^2 . ^\circ C] \quad (3.1)$$

onde:

- d – espessura do elemento construtivo [m];
- λ – condutibilidade térmica [W/m.°C];

Após obter-se os valores das resistências térmicas de todos os materiais que constituem o elemento construtivo, pode-se calcular o coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo.

Este coeficiente calcula-se através da seguinte expressão:

- Elementos da envolvente exterior:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} = \frac{1}{R_{si} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{se}} \quad (3.2)$$

- Elementos da envolvente interior:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{si}} = \frac{1}{R_{si} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{si}} \quad (3.3)$$

onde:

- R_{si} – resistência térmica superficial interior [m².°C/W];
- R_{se} – resistência térmica superficial exterior [m².°C/W];
- R_j – resistência térmica de cada elemento [m².°C/W];

Apesar do RCCTE apresentar os valores de R_{si} , R_{se} e a resistência térmica de espaços de ar não ventilados, este não apresenta valores de condutibilidade térmica que permitam aferir a resistência térmica de um determinado elemento construtivo.

Para o cálculo da resistência térmica dos elementos construtivos tem de se recorrer a publicações da especialidade. Nesta dissertação recorreu-se à publicação do LNEC, ITE-50, tendo-se utilizado, sempre que não era dado qualquer tipo de referência por parte do fabricante, a menor massa volúmica para o material, de forma a não beneficiar o isolamento acústico, uma vez que o RRAE é mais exigente em termos práticos de verificação.

O RCCTE apresenta valores de referência que servem, essencialmente, de guia em projecto, ou seja todas as soluções adoptadas devem ter coeficientes inferiores aos de referência de forma a facilitar o cumprimento regulamentar (essencialmente no Inverno).

3.3.3. Inércia Térmica

O coeficiente de transmissão térmica dos elementos constituintes do edifício é um dos parâmetros necessários para a definição da classe energética do edifício. Este define a facilidade com que ocorre as trocas de calor e consequentemente a facilidade com que ocorre perdas de calor no edifício. Contudo não é apenas o coeficiente de transmissão térmica que é necessário calcular para a correcta definição dos elementos constituintes do edifício. É necessário também proceder ao cálculo da inércia térmica do edifício.

A inércia térmica é uma característica bastante importante nos edifícios porque condiciona a eventual ocorrência de desfasamentos temporais na transmissão de calor, podendo contribuir de forma muito significativa para a obtenção de melhores condições de conforto (caso de inércia térmica forte). Ou seja a inércia térmica é a maior ou menor capacidade que um determinado elemento tem de absorver o calor e a menor ou maior facilidade com que o liberta.

Genericamente, a inércia térmica depende, sobretudo, de duas características dos elementos construtivos: a sua massa e a sua condutibilidade térmica. No que diz respeito à sua contribuição para a obtenção de conforto térmico, deve ainda considerar-se a localização de uma eventual camada de isolante térmico e o tipo de revestimento interior. De facto, apenas os materiais que se encontram entre o ambiente interior e o isolante deverão ser considerados uma vez que, para o lado exterior do isolante térmico, o fluxo de calor é muito reduzido. Por outro lado, materiais de revestimento com condutibilidade térmica reduzida constituem um obstáculo ao aproveitamento da inércia térmica dos materiais adjacentes.

Estas características dos elementos construtivos, quando bem aproveitadas, permitem diminuir os gastos energéticos em arrefecimento durante o dia (Verão), e os gastos energéticos em aquecimento (Inverno), uma vez que os elementos absorvem o calor durante o dia e quando chega à noite, e a temperatura ambiente exterior diminui, estes começam a libertar o calor armazenado durante o dia, mantendo a temperatura interior mais ou menos estabilizada entre o dia e a noite.

A inércia térmica quer-se o mais alta possível, até um certo limite, porque no Inverno permite absorver mais calor durante o dia e libertá-lo, quando é mais necessário, à noite, aumentando a temperatura interior e porque no Verão durante o dia absorve o calor, atrasando o aumento da temperatura interior em relação à exterior e à noite, com a diminuição da temperatura do ar exterior, liberta-o. Para fazer face à libertação de calor dos elementos no Verão durante a noite basta abrir as janelas para que grande parte do calor seja dissipado e torne o interior suficientemente confortável, tendo ainda como vantagem o

rápido arrefecimento, ou perda de calor, dos elementos construtivos e consequentemente uma temperatura interior diurna inferior à exterior.

O posicionamento do isolamento térmico de um elemento da envolvente exterior é importantíssimo, como já foi referido anteriormente, para a inércia térmica.

Se o isolamento térmico estiver do lado exterior, a massa superficial será igual à soma das massas superficiais dos vários elementos que a constituem, excepto do isolamento, logo terá a melhor inércia térmica possível para esse elemento. Contrariamente, se o isolamento estiver posicionado no lado interior, esse elemento terá a pior inércia térmica possível uma vez que não tem qualquer elemento que absorva calor no interior e que depois o liberte; neste caso, o que acontecerá é que a incidência dos raios solares no interior do compartimento contribui imediatamente para a subida da temperatura, correndo-se o risco de um sobreaquecimento no período diurno.

No RCCTE existem limitações impostas na quantificação da massa superficial útil, M_{si} , que a partir de um determinado valor é considerada desprezável e que em casos de elementos sem isolamento térmico, além da limitação, o valor é considerado metade, como será explicado mais à frente.

A massa útil tem uma limitação superior porque a partir de um determinado valor (150kg/m^2 ou 300 kg/m^2 consoante seja um elemento construtivo da envolvente ou de compartimentação interior, respectivamente) considera-se que o contributo desse acréscimo de massa útil é desprezável, visto que exposição ao calor em ciclos de 24h não afecta mais que aqueles valores.

Quando não existe isolamento térmico nos elementos a massa útil é considerada metade uma vez que se supõe que metade da massa contribui para o lado interior e a outra metade para o lado exterior.

A Figura 3.3 exemplifica o que foi referido anteriormente.

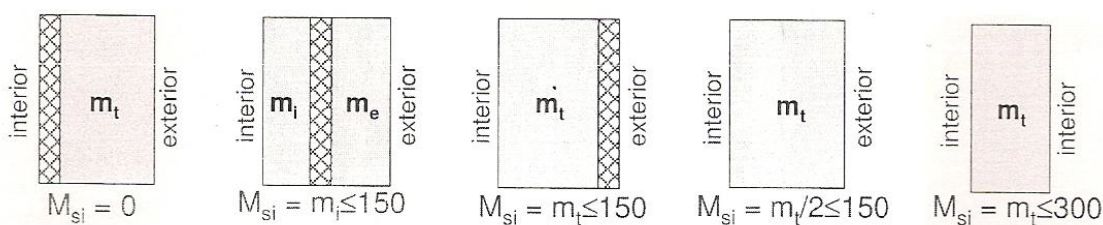


Figura 3.3 — Exemplos de quantificação de massas superficiais. [20]

Finalmente, a inércia térmica calcula-se através da seguinte expressão:

$$I_t = \frac{\sum (M_{si} \times r_i \times S_i)}{A_p} \quad (3.4)$$

onde:

- M_{si} – massa útil [kg/m²];
- S_i – área da superfície interior do elemento [m²];
- A_p – área útil de pavimento [m²];
- r_i – correcção devida ao revestimento interior;

Para o cálculo da inércia térmica, como indica a expressão 3.4, é necessário calcular o parâmetro de correcção devida ao revestimento interior, r_i .

Este parâmetro possibilita a correcção do valor da inércia térmica devido isolamento térmico que o revestimento superficial confere ao elemento.

O factor de correcção pode ser obtido através do quadro seguinte:

Quadro 3.1 – Correcção devida ao revestimento interior, r_i . [19]

Elemento Construtivo	Resistência Térmica do Revestimento Superficial [m ² .°C/W]	r_i
<ul style="list-style-type: none"> Exterior; Outra Fracção Autónoma; Locais não aquecidos Terreno 	$R \leq 0,14$	1
	$0,14 < R \leq 0,30$	0,5
	$R > 0,30$	0
<ul style="list-style-type: none"> Compartimentação Interior 	$R \leq 0,14$	1
	$R > 0,14$ (numa das faces)	0,75
	$R > 0,14$ (em ambas as faces)	0,5

Sucintamente, um elemento construtivo com um revestimento superficial com uma elevada resistência térmica, ou seja uma baixa condutibilidade térmica, faz com que a transmissão de calor entre a superfície do elemento e o restante elemento seja mais difícil de ocorrer que num elemento cujo revestimento superficial tenha uma baixa resistência térmica, logo a influência da inércia térmica na manutenção da temperatura interior é tanto menor quanto maior é a resistência térmica. Por isto é que o factor de correcção é zero para resistências altas de alguns tipos de elementos construtivos, considera que o revestimento superficial funciona como um isolamento térmico, e despreza a existência de qualquer

quebra na troca de calor entre as varias camadas dos elementos para resistências térmicas superficiais baixas.

3.3.4. Pontes Térmicas

A envolvente opaca dos edifícios deveria ser, idealmente, homogénea em toda a sua continuidade para assim ser evitado o aparecimento de pontes térmicas planas.

As pontes térmicas planas são, como foi dado a entender anteriormente, heterogeneidades existentes em zonas correntes da envolvente, como na zona da caixa de estore, pilares e vigas.

O RCCTE obriga à quantificação destas pontes térmicas uma vez que o respectivo fluxo de calor acrescido, face ao que se verifica em zona corrente, pode ser importante. Assim, para além de aumentar a necessidade de energia para obtenção de conforto, esta zona da envolvente apresenta grandes riscos de formação de condensações superficiais e todos os problemas daí resultantes, como fungos e bolores.

Com o objectivo de minimizar as perdas térmicas resultantes dessas pontes térmicas, o RCCTE obriga à sua quantificação. Para tal, o RCCTE define o máximo admissível para coeficiente de transmissão térmica da zona de ponte térmica, calculado de forma unidireccional na direcção normal à envolvente, que deve ser inferior ao dobro da zona corrente homóloga e define, também, o máximo admissível para qualquer zona, corrente ou de ponte térmica plana, através do quadro IX.1 do RCCTE.

Além das pontes térmicas planas, o regulamento também obriga à quantificação das pontes térmicas lineares.

As pontes térmicas lineares resultam do facto de haver concentrações de fluxo de calor nas ligações entre elementos construtivos.

Para a quantificação deste tipo de pontes tem que se multiplicar o seu desenvolvimento linear pelo seu coeficiente de transmissão térmica linear, Ψ . O coeficiente está definido para algumas soluções tipo no regulamento e para as que não estejam definidas adopta-se o valor 0,5 ou recorre-se à norma EN ISO 10211-1.

Embora muitas vezes não seja dada a devida importância às perdas térmicas lineares, o que é facto é que elas podem representar mais de 50% das perdas térmicas superficiais em soluções cujo isolamento térmico não seja adequado.

3.3.5. Factor de Forma

A envolvente opaca tem uma grande relevância, como seria de esperar e como foi visto até aqui, na qualidade do conforto térmico de uma habitação, uma vez que é por ela que ocorre uma parte importante das trocas térmicas. Contudo a geometria do próprio edifício também é bastante relevante para a atribuição da classificação energética.

No regulamento o parâmetro que avalia a geometria do edifício é designado por factor forma.

O factor define-se, segundo o próprio regulamento, como o “quociente entre o somatório das áreas da envolvente exterior e interior do edifício ou fracção autónoma com exigências térmicas e o respectivo volume interior”.

Este factor pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$FF = \frac{[A_{\text{ext}} + \sum (\tau \times A_{\text{int}})_i]}{V} \quad (3.5)$$

onde:

- A_{ext} – área da envolvente exterior [m^2];
- A_{int} – área da envolvente interior [m^2];
- V – volume interior [m^3];
- τ – tau;

O coeficiente τ representa uma relação entre temperaturas que é dado pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{\theta_i - \theta_a}{\theta_i - \theta_{\text{atm}}} \quad (3.6)$$

onde:

- θ_i – temperatura interior (admitida como a temperatura do ar referida no nº4 do artigo 4.º)[$^{\circ}\text{C}$];
- θ_{atm} – temperatura do ambiente exterior[$^{\circ}\text{C}$];
- θ_a – temperatura do local não aquecido[$^{\circ}\text{C}$];

Embora a expressão anterior para o cálculo do τ pareça bastante fácil de calcular, ela pode revelar-se algo complicada devido ao facto de não se conseguir, muitas vezes, saber a temperatura do ar do local não aquecido. Para fazer face a esta dificuldade o regulamento apresenta a tabela IV.1 com alguns valores de τ dependentes da relação entre a área que

separa o espaço útil interior do espaço não útil e a área do elemento que separa o espaço não útil do ambiente exterior.

Para o mesmo volume, quanto maior for a área exposta maior irá ser o factor forma e consequentemente mais prejudicial irá ser para a eficiência energética uma vez que permitirá a ocorrência de mais perdas térmicas. Este caso é perceptível na Figura 3.4.

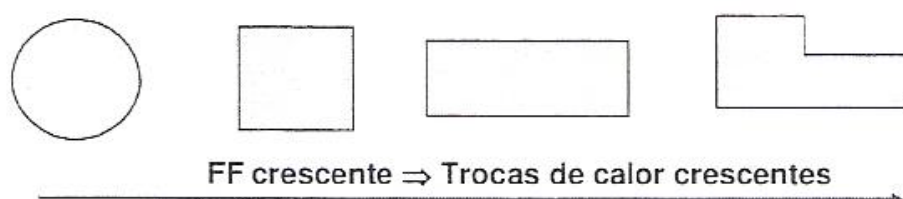


Figura 3.4 – Exemplos de factores forma. [20]

A Figura 3.5 é outro exemplo semelhante ao da Figura 3.4 onde é apresentado um edifício com o mesmo volume mas em que os pisos estão dispostos de forma diferente.

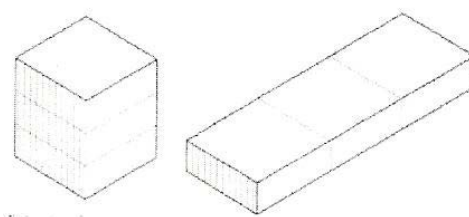


Figura 3.5 – Exemplo de factores forma para dois edifícios de igual volume. [20]

Deste exemplo pode-se concluir que o edifício de um piso tem um factor forma superior ao de vários pisos, uma vez que a área de exposição é superior e consequentemente haverá mais perdas térmicas, ou seja trocas de calor.

Da avaliação feita ao factor forma percebe-se que para se obter um edifício eficiente é necessário ter o cuidado de, em projecto, otimizar a geometria de forma a minimizar, o mais possível, o valor deste.

3.3.6. Factor Solar

A envolvente dos edifícios ou das fracções autónomas é constituída por elementos opacos (pavimentos, paredes e coberturas) e por envidraçados.

Os envidraçados, por serem transparentes ou translúcidos e por terem valores de coeficiente de transmissão térmica superiores, permitem maiores trocas energéticas.

Para quantificar as trocas energéticas pelos envidraçados relativas à radiação solar, o RCCTE, define vários parâmetros. Entre estes parâmetros estão: o factor solar do vidro, que é analisado nesta dissertação, o factor de obstrução, a fracção envidraçada e o factor de correcção da selectividade angular dos envidraçados.

O factor solar é o parâmetro que nos permite quantificar a relação entre a energia transmitida para o interior do edifício ou fracção autónoma e a energia incidente sobre o envidraçado. Este é dado pela seguinte expressão:

$$g_v = \frac{E_D + E_d}{E_i} \quad (3.7)$$

onde:

- E_D – energia incidente que é transmitida directamente;
- E_d – energia acumulada que passa para o interior;
- E_i – energia incidente sobre o envidraçado;

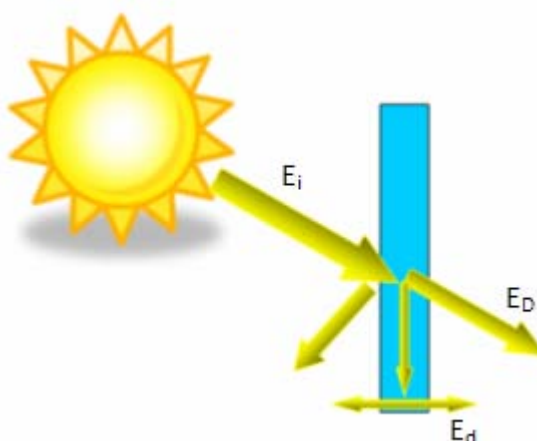


Figura 3.6 – Energia Solar incidente sobre um envidraçado. [20]

Na Figura 3.6 é perceptível que a energia solar ao incidir sobre o envidraçado, parte dessa energia solar incidente sobre o envidraçado é reflectida, outra parte da energia solar é transmitida para o interior directamente, E_D , outra parte da energia é absorvida pelo próprio envidraçado e depois parte dessa energia absorvida é transmitida para o interior, E_d .

Logo pela análise da expressão e da Figura 3.6, conclui-se que o factor solar irá depender das propriedades de reflexão, absorção e transmissão do envidraçado.

Para uma melhor eficiência energética é necessário, então, ter cuidado com a escolha do tipo de envidraçado porque um envidraçado com um factor solar muito elevado irá permitir o sobreaquecimento da habitação no Verão e por isso irá tornar necessário a activação de dispositivos de climatização para o arrefecimento da habitação, o que implicará elevados

gastos energéticos, algo que se deve evitar para que uma habitação tenha uma boa classe energética.

Por outro lado, um factor solar muito baixo reduz os ganhos solares no Inverno, o que dá origem a mais necessidades de energia para aquecimento.

Uma vez que o cumprimento das necessidades energéticas na estação de aquecimento é mais difícil de cumprir que na estação de arrefecimento, é mais vantajoso a nível regulamentar ter um factor solar elevado.

3.3.7. Necessidades Energéticas

A temperatura exterior e a temperatura interior de um edifício/fracção, onde se aplique o RCCTE, normalmente, não são iguais. No interior, para que haja um certo conforto térmico, o regulamento considera uma temperatura mínima de 20°C no Inverno e uma temperatura máxima de 25°C no Verão o que implica a tomada de cuidados para que não haja grandes perdas térmicas no Inverno e ganhos excessivos no Verão.

Na estação de aquecimento, Inverno, supondo que existe no interior do edifício/fracção um termóstato que mantém a temperatura constante nos 20°C, facilmente se percebe que a energia auxiliar que terá de ser gasta para o aquecimento do edifício/fracção é igual à diferença entre as perdas através da envolvente, por condução, convecção e radiação, e os ganhos solares e internos.

Toda esta situação de ganhos e perdas é perceptível na Figura 3.7.

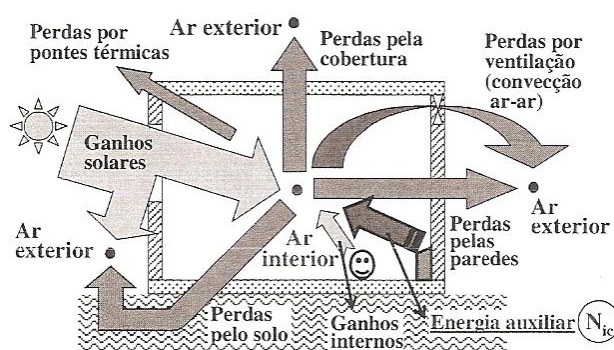


Figura 3.7 — Trocas térmicas na estação de aquecimento. [20]

O anexo IV do RCCTE define a expressão de cálculo das necessidades anuais de aquecimento do edifício, sendo esta:

$$N_{ic} = \frac{(Q_t + Q_v - Q_{gu})}{A_p} \quad (3.8)$$

onde:

- N_{ic} – necessidades anuais nominais de aquecimento [kWh/ano];
- Q_t – perdas de calor por condução pela envolvente [kWh];
- Q_v – perdas de calor resultantes da renovação do ar [kWh];
- Q_{gu} – ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento [kWh];
- A_p – área útil de pavimento [m^2];

Nas perdas de calor por condução pela envolvente o regulamento inclui as perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contacto com o exterior (Q_{ext}) e locais não aquecidos (Q_{ina}), perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo (Q_{pe}) e perdas pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício (Q_{pt}).

Os ganhos térmicos na estação de aquecimento são iguais à soma dos ganhos internos associados a fontes internas de calor (Q_i), como a ocupação, equipamentos e iluminação e ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar (Q_s).

Todos os ganhos e perdas que foram descritos podem ser facilmente calculados com expressões que o regulamento define, pelo que não serão explicadas nesta dissertação, uma vez que também não é o objectivo desta explicar as fórmulas de cálculo.

A partir do mesmo raciocínio o regulamento contabiliza para a estação de arrefecimento, Verão, as necessidades de arrefecimento.

Nas necessidades de arrefecimento estão contabilizadas os ganhos brutos (Q_g) que são iguais à soma dos ganhos por condução através da envolvente (Q_1), com os ganhos solares através dos envidraçados (Q_2), com os ganhos por renovação do ar (Q_3) e com os ganhos internos devido à ocupação, equipamentos e iluminação (Q_4).

O cálculo dos ganhos solares no Inverno e no Verão são feitos de forma distinta.

No Inverno, estação de aquecimento, considera-se, segundo o regulamento, as protecções desactivadas, isto para maximizar os ganhos solares pelos envidraçados. No Verão, estação de arrefecimento, como o objectivo é diminuir os ganhos solares pelos envidraçados, o regulamento considera que os dispositivos de protecção estão 70% activos, ou seja o factor solar no Verão do envidraçado é igual a 30% do factor solar do vidro com uma cortina muito transparente, mais 70% do factor do vidro com a protecção 100% activa.

Na Figura 3.8 é perceptível esta consideração que o regulamento faz para o factor solar no Verão. Na Figura 3.8 pode-se observar que 70% da área do vão envidraçado tem a protecção activa, o que faz com que a radiação incidente, I_r , seja filtrada inicialmente pela protecção, g_p , e depois pelo envidraçado, g , e 30% da área do vão envidraçado tem a

protecção desactivada ou seja a radiação incidente vai ser filtrada pelo vidro mais a cortina muito transparente, g_v .

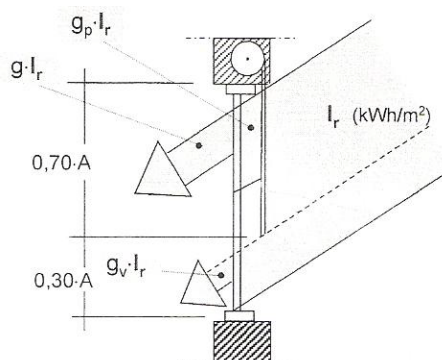


Figura 3.8 — Radiação incidente sobre o envidraçado. [20]

Na Figura 3.9, à semelhança do que foi apresentado para as necessidades de aquecimento, tem-se os ganhos e as perdas térmicas existentes num edifício/fracção.

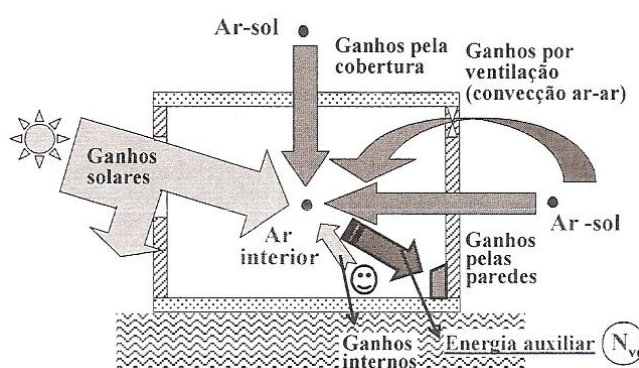


Figura 3.9 — Trocas térmicas na estação de arrefecimento. [20]

Após calcular-se os ganhos brutos (Q_g) através dos métodos explicados no anexo V do RCCTE, facilmente se obtém todos os parâmetros necessários ao cálculo das necessidades de arrefecimento.

As necessidades de arrefecimento obtêm-se pela seguinte expressão:

$$N_{vc} = (1 - \eta) \times Q_g \text{ [kWh/ano]} \quad (3.9)$$

onde:

- η – factor de utilização;
- Q_g – ganhos brutos [kWh];

O factor de utilização, η , representa a fracção dos ganhos utilizáveis para o conforto ambiente na estação de aquecimento.

Outro conceito que é importante referir, que aparece representado na Figura 3.7 e Figura 3.9, é a temperatura ar-sol.

A temperatura ar-sol é uma simplificação que o regulamento, também, prevê que permite a quantificação da combinação do efeito da temperatura exterior com a radiação solar a uma só temperatura.

Após ter sido referido as necessidades de arrefecimento e aquecimento, falta apenas referir uma última necessidade, a necessidade de energia útil para o aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS). Esta necessidade energética não será desenvolvida nesta dissertação, uma vez que se encontra fora do âmbito desta.

Com todas as necessidades energéticas calculadas (aquecimento, arrefecimento e AQS) consegue-se obter as necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária através da expressão:

$$N_{tc} = 0,1 \times (N_{ic} / \eta_i) \times F_{pui} + 0,1 \times (N_{vc} / \eta_v) F_{puv} + N_{ac} \times F_{pua} \quad [\text{kgep/m}^2.\text{ano}] \quad (3.10)$$

onde:

- N_{ic} – necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/m².ano];
- N_{vc} – necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/m².ano];
- N_{ac} – necessidades nominais anuais de energia útil para produção de águas quentes sanitárias [kWh/m².ano];
- η_i – eficiência dos sistemas de aquecimento;
- η_v – eficiência dos sistemas de arrefecimento;
- F_{pui} – factores de conversão de energia útil para energia primária relativo ao aquecimento [kgep/kWh];
- F_{puv} – factores de conversão de energia útil para energia primária relativo ao arrefecimento [kgep/kWh];
- F_{pua} – factores de conversão de energia útil para energia primária relativo ao AQS [kgep/kWh];

Na eficiência dos sistemas de aquecimento e arrefecimento o regulamento permite a utilização de valores fornecidos pelos próprios fabricantes, contudo por vezes esses dados não são possíveis de obter por isso o regulamento define também no Artigo 18º alguns valores de referência que podem ser adoptados.

Nas necessidades globais anuais nominais aparecem três factores de conversão de energia útil para energia primária.

Esta conversão de energia útil para energia primária aparece devido à necessidade de comparar formas de energia iguais.

A energia útil, como o calor, iluminação ou força motriz, tem como fonte de energia a energia final obtida a partir de produtos que já sofreram alterações, como os derivados do petróleo, gás natural, electricidade ou biomassa. A energia final, por sua vez, tem origem em recursos energéticos existentes na natureza e designa-se por energias primárias, como o petróleo bruto, lenha, carvão, sol, vento, ondas, gás natural.

A transformação da energia primária para energia final irá produzir perdas assim como a conversão da energia final para energia útil. Por este motivo e para que se consiga perceber a quantidade de recursos naturais que são consumidos em cada necessidade nominal, o regulamento colocou os factores de conversão energéticos.

A unidade de conversão que o regulamento prevê de energia útil para energia primária é o kgep, ou seja o quilograma equivalente de petróleo, que é, actualmente, a fonte de energia primária com maior importância a nível mundial.

O regulamento, além de permitir o cálculo das necessidades nominais, também estabelece valores limites.

Através do Artigo 15º é possível obter os valores limite para:

- Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_i);
- Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_v);
- Necessidades nominais anuais de energia útil para produção de AQS (N_a);
- Necessidades globais anuais nominais anuais de energia primária (N_t);

Para que um edifício ou fracção cumpra o regulamento, os valores das necessidades devem cumprir os seguintes limites regulamentares:

$$\begin{aligned} N_{ic} &\leq N_i \\ N_{vc} &\leq N_v \\ N_{ac} &\leq N_a \\ N_{tc} &\leq N_t \end{aligned} \quad (3.11)$$

Após o cálculo das necessidades globais anuais nominais e de se ter verificado o cumprimento dos limites anteriores é possível aferir a classe energética do edifício ou fracção autónoma pela seguinte expressão:

$$R = \frac{N_{tc}}{N_t} \quad (3.12)$$

As classes energéticas dependem do valor de R e são as seguintes:

Quadro 3.2 – Classes energéticas.

Classe Energética	
A+	$R \leq 0,25$
A	$0,25 < R \leq 0,50$
B	$0,50 < R \leq 0,75$
B-	$0,75 < R \leq 1,00$
C	$1,00 < R \leq 1,50$
D	$1,50 < R \leq 2,00$
E	$2,00 < R \leq 2,50$
F	$2,50 < R \leq 3,00$
G	$R > 3,00$

Por fim, à que referir que o regulamento não permite a construção de edifícios novos com classe energética inferior a B-. Nos edifícios existentes o regulamento não apresenta qualquer obrigatoriedade de classe mínima.

4. Cálculo de Soluções Construtivas

As preocupações energéticas e de conforto no interior dos edifícios tem aumentado ao longo do tempo.

Para fazer face a esta crescente preocupação surgiram dois regulamentos, o RCCTE e RRAE, que obrigaram os projectistas a serem mais cuidadosos na definição das soluções construtivas a adoptar.

Uma vez que a construção passou a ser limitada por regulamentos mais rigorosos, os fabricantes de materiais, para responder a estas exigências, foram obrigados a inovar e encontrar materiais e soluções construtivas mais exigentes do ponto de vista térmico e acústico para que estas se adaptem a esta nova realidade.

Com o crescente número de materiais e soluções construtivas a surgir no mercado procurou-se, através desta dissertação, tentar fornecer informação, para cada tipo de solução, acerca do seu nível de isolamento sonoro a sons aéreos, R_w , e, nas soluções onde é aplicável, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, L_w . Além dos isolamentos sonoros analisa-se também as soluções quanto ao isolamento térmico, através do coeficiente de transmissão térmica, U .

Actualmente, os métodos de previsão acústica a sons aéreos, ou são muito complexos, requerendo formação específica para o seu entendimento e correcta aplicação, ou são calculados a partir de um software da especialidade, como o Acoubat®, ou, por fim, a partir de expressões de cálculo de aplicabilidade bastante simples e que têm por base a experiência *in situ* dos seus autores. Estas expressões de cálculo, devido à sua simplicidade, são pouco fiáveis, servindo apenas para orientar e não para prever, com o rigor necessário em qualquer projecto, o índice de isolamento sonoro a sons aéreos que se encontrará *in situ*.

Para a elaboração desta dissertação foram analisadas várias expressões simples de cálculo de isolamento sonoro a sons aéreos. Das expressões analisadas procurou-se encontrar uma expressão cuja fiabilidade fosse razoável para a elaboração desta dissertação. Os critérios para definir esta fiabilidade foram:

- A expressão não depender apenas da massa superficial da solução construtiva;
- Os desvios entre os valores obtidos pelos fabricantes/medições *in situ* e os obtidos pela expressão serem tão pequenos quanto possível;

Com base nestes dois critérios chegou-se à conclusão, como será demonstrado na Figura 4.1 e Figura 4.2, que as melhores expressões a utilizar seriam a 2.58 e 2.59, ou seja o

Modelo Misto de Meisser revisto por Mateus e Tadeu [15], por estas apresentarem uma diferença para os valores de isolamento fornecidos pelos fabricantes/medições *in situ* aceitável, como será analisado no capítulo 5, Análise de Resultados, e por estas expressões dependerem não só da massa superficial da solução como também da espessura da caixa-de-ar, da espessura do material absorvente e dos tipos de panos que compõem cada solução.

Nos pavimentos e respectivos revestimentos, além do índice de isolamento a sons aéreos também foi efectuado o cálculo do índice de isolamento a sons de percussão. O índice de isolamento a sons de percussão foi calculado com base na expressão adaptada da norma EN ISO 12354-2.

O índice de isolamento a sons de percussão foi calculado a partir da expressão 2.75 [9], porque, contrariamente ao índice de isolamento a sons aéreos, é unânime entre os vários autores pesquisados que a expressão existente na norma EN ISO 12354-2, após a correcção de 5 dB, permite obter valores de previsão do índice de isolamento a sons de percussão muito próximos aos registados *in situ*.

O coeficiente de transmissão térmica, U, foi obtido com base nos valores existentes na publicação ITE-50 do LNEC [22], com a excepção para os casos em que o fornecedor ou outras entidades disponibilizaram as características dos materiais e para o caso das alvenarias de tijolo, cujos valores foram retirados do Manual de Alvenaria de Tijolo [27].

Os valores das alvenarias de tijolo não foram retirados da ITE-50 porque esta publicação do LNEC apenas apresenta valores de massa volúmica aparente seca para os vários tipos de materiais, o que torna necessário saber, neste caso, para cada tipo de tijolo o seu volume em material cerâmico, algo complicado de se saber uma vez que não é um material homogéneo. Como o Manual de Alvenaria de Tijolo [27] apresenta directamente, para os vários tipos de tijolo, a massa superficial das paredes de alvenaria de tijolo com um centímetro de espessura de juntas verticais e horizontais, foi optado recorrer-se à sua utilização para os cálculos nesta dissertação.

Nas soluções onde foi necessário recorrer à ITE-50 para se obter os valores de massa superficial e o coeficiente de transmissão térmica optou-se, na dúvida, pelo menor valor de massa volúmica para, desta forma, se estar sempre do lado da segurança e tornar os índices, de isolamento acústico e térmico, mais exigentes.

Após a correcta definição das expressões e dados a utilizar foi possível elaborar o Anexo I.

O Anexo I é composto por um quadro onde estão representadas as várias características, térmicas e acústicas, e os grupos das diferentes soluções analisadas.

Para cada solução foram analisadas as seguintes características:

- Características gerais:

- Espessura total da solução;

- Características Acústicas:

- Massa superficial – Valor resultante da soma das multiplicações das espessuras das várias camadas pelos respectivos valores de massa volúmica aparente seca existentes na ITE-50 [22], com excepção para as alvenarias de tijolo cujo valor foi retirado directamente do Manual de Alvenaria de Tijolo [27] e para os casos em que a “Fonte” forneceu esta informação;

- $R_{w,calc}$ – Valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos calculado com base nas expressões 2.58 e 2.59;

- $R_{w,exp}$ – Valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos fornecido pela “Fonte”;

- Fonte – Entidade ou pessoa que forneceu as informações sobre o índice de isolamento sonoro a sons aéreos, $R_{w,exp}$, e/ou sobre o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L_{w,calc}$, nas soluções onde é calculado. Em algumas soluções esta fonte também forneceu o coeficiente de transmissão térmica, U , estando estas soluções assinaladas com “*” nos seus respectivos valores de U ;

- $L_{w,cal}$ – Valor de isolamento acústico a sons de percussão calculado com base na expressão 2.75;

- $L_{w,exp}$ – Valor de isolamento acústico a sons de percussão fornecido pela “Fonte”;

- ΔL_w – Valor do incremento de isolamento acústico a sons de percussão dado pela solução de revestimento de piso, fornecido pela “Fonte”;

- Características Térmicas:

- U – Valor do coeficiente de transmissão térmica calculado com base nos valores de condutibilidade térmica e/ou nos valores de resistência térmica existentes na ITE-50 [22], com excepção para as alvenarias de tijolo cujo valor foi retirado do Manual de Alvenaria de Tijolo [27] e as soluções cujo valor foi dado pela Fonte;

- Massa Total – Valor resultante da soma das multiplicações das espessuras das várias camadas pelos respectivos valores de massa volúmica aparente seca existentes na ITE-50 [22], com excepção para as alvenarias de tijolo cujo valor foi retirado directamente do Manual de Alvenaria de Tijolo [27] e para os casos em que a “Fonte” forneceu esta

informação. Para o valor desta massa não foram contabilizados os valores de massa superficial dos isolamentos térmicos e das camadas existentes entre isolamentos térmicos;

- Tipo de Parede – Define o tipo de envolvente do elemento;
- Massa Superficial – Valor da massa total contabilizado para efeitos de inércia térmica, segundo as regras definidas no capítulo 3.3.3;
- Resistência Térmica do Revestimento Superficial – Calculado apenas nos revestimentos de pavimento, define a resistência térmica do revestimento superficial segundo o processo explicado no capítulo 3.3.2 para que se consiga avaliar a influência do revestimento de pavimento na inércia térmica do elemento;

Após se terem definido estes índices, R_w , L_w e U , foram elaborados dois quadros e duas figuras de forma a interpretar melhor os valores obtidos.

No Quadro 4.7 é apresentado para cada solução o seu respectivo cumprimento regulamentar, em relação ao RRAE e ao RCCTE. Nos mínimos regulamentares imposto pelo RRAE foi considerado o efeito das transmissões marginais e por isso, como foi referido no capítulo 2.3.4, os mínimos regulamentares foram aumentados em 5 dB por não ser contabilizado este efeito na expressão de cálculo utilizada. Logo para o $D_{nT,w}$ foi considerado como valor mínimo regulamentar de R_w 55 dB, aumentou-se a exigência em 5 dB, que no RRAE é de 50 dB para a maioria das zonas interiores, e para a envolvente exterior o mínimo regulamentar do $D_{2m,nT,w}$ foi considerado de 38 dB, que no RRAE é de 33 dB, como está explícito no Quadro 2.22 e na Figura 2.63.

Resumidamente, as condições adoptadas nesta dissertação para que as soluções analisadas cumpram o RRAE são:

- Para Paredes Interiores

$$R_w \geq 55 \text{ dB} \quad (4.1)$$

- Para Paredes Exteriores

$$R_w \geq 38 \text{ dB} \quad (4.2)$$

As condições para que as soluções cumpram o RCCTE são as referidas no Quadro IX.1 do Anexo IX do RCCTE.

Além dos mínimos regulamentares, as soluções também foram analisadas quanto ao cumprimento dos valores de referência existentes no Quadro IX.3 do Anexo IX do RCCTE. Em todas as soluções onde os valores mínimos de referência eram cumpridos, para as respectivas zonas climáticas de Inverno e tipo de envolvente, foi colocado ao lado do “Sim” do cumprimento dos mínimos regulamentares do RCCTE um “*”.

O Quadro 4.7 tem como objectivo permitir analisar quais as soluções, das pesquisadas nesta dissertação, que cumprem os mínimos regulamentares do RRAE e RCCTE e das que cumprem os mínimos do RCCTE aquelas que cumprem, igualmente, os valores mínimos de referência definidos neste mesmo regulamento.

Após a elaboração do Quadro 4.7 com os respectivos cumprimentos regulamentares para cada solução foi elaborado o Quadro 4.8 com o objectivo de conseguir analisar a qualidade, em termos acústicos e térmicos, das soluções estudadas.

O Quadro 4.8 encontra-se dividido em duas colunas principais, uma designada por “Posição” e a outra por “Ponderação Acústica”.

Na coluna da “Posição” é definido, por ordem decrescente e para cada grupo de soluções, as melhores soluções de isolamento térmico e acústico, sem ter em linha de conta o cumprimento regulamentar.

A coluna da “Ponderação Acústica” encontra-se dividida em três sub-colunas, 1x, 1,5x e 2x.

Nas sub-colunas do Quadro 4.8 procura-se quantificar, para as soluções que cumprem os mínimos regulamentares de ambos os regulamentos, a diferença entre os valores mínimos do RRAE e do RCCTE e os valores do índice de isolamento térmico e acústico, respectivamente. Para este cálculo, uma vez que todas as soluções que cumprem os mínimos regulamentares do RCCTE para uma zona climática de Inverno I3 cumprem igualmente para a zona I1 e I2, considerou-se, para este cálculo, como limite regulamentar o imposto para a zona climática I3 no Quadro IX.1 do Anexo IX do RCCTE, por este ser o valor mais exigente a nível térmico.

As expressões utilizadas para esta quantificação foram:

- Elementos Interiores Verticais:

$$\%_{\text{interior}} = \frac{\left(\frac{1,90 - U}{1,90} + P_{\text{ond}} \times \frac{R_{w,\text{calc}} - 55}{55} \right)}{1 + P_{\text{ond}}} \times 100 \quad (4.3)$$

- Elementos Exteriores Verticais:

$$\%_{\text{exterior}} = \frac{\left(\frac{1,45 - U}{1,45} + P_{\text{ond}} \times \frac{R_{w,\text{calc}} - 38}{38} \right)}{1 + P_{\text{ond}}} \times 100 \quad (4.4)$$

- Elementos Interiores Horizontais:

$$\%_{\text{interior}} = \frac{\left(\frac{1,20 - U}{1,20} + P_{\text{ond}} \times \frac{R_{w,\text{calc}} - 55}{55} \right)}{1 + P_{\text{ond}}} \times 100 \quad (4.5)$$

- Elementos Exteriores Horizontais:

$$\%_{\text{exterior}} = \frac{\left(\frac{0,90 - U}{0,90} + P_{\text{ond}} \times \frac{R_{w,\text{calc}} - 38}{38} \right)}{1 + P_{\text{ond}}} \times 100 \quad (4.6)$$

onde:

- P_{ond} – Ponderação acústica, 1x, 1,5x ou 2x;
- U – Coeficiente de transmissão térmica, $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$;
- $R_{w,\text{calc}}$ – índice de isolamento sonoro a sons aéreos calculado através das expressões 2.58 e 2.59, $[dB(A)]$;

Nos quadros seguintes são definidos os vários grupos de soluções. Dentro de cada grupo estão definidas as várias soluções analisadas nesta dissertação e o seu respectivo número, “Nº”. O número, “Nº”, é definido para tornar todos os quadros posteriores a estes menos densos e para melhorar a sua visualização.

Quadro 4.1 – Paredes Simples.

Nº	Descrição
1	reb. (20) – alv. (70) – reb. (20)
2	reb. (20) – alv. (110) – reb. (20)
3	reb. (20) – alv. (150) – reb. (20)
4	reb. (20) – alv. (200) – reb. (20)
5	reb. (20) – alv. (220) – reb. (20)
6	reb. (25) - bloco argila expandida (170) – reb. (25)
7	reb. (25) - bloco argila expandida (200) – reb. (25)
8	reb. (25) - bloco argila expandida (315) – reb. (15)
9	reb. (20) - bloco argila expandida (110) – reb. (20)
10	reb. (20) - bloco argila expandida (150) – reb. (20)
11	reb. (20) - bloco argila expandida (200) – reb. (20)
12	reb. (25) - bloco argila expandida (250) – reb. (25)
13	alv. de pedra (400)
14	reb. (20) – alv. furação vertical (140) – reb. (20)
15	reb. (20) – alv. furação vertical (190) – reb. (20)
16	reb. (20) – alv. furação vertical (240) – reb. (20)
17	reb. (20) – alv. furação vertical (290) – reb. (20)
18	reb. (20) – alv. (110) - reboco (20) - icp (30) - PGC (13)
19	reb. (20) – alv. (110) - corkoco (40) - PGC (13)
20	reb. (15) – xps (60) – alv. (220) - reb (20)
21	reb. (6) - icb (12) - alv (220) - PGC (12)
22	betão armado (150)
23	betão armado (200)
24	betão armado (250)
25	reb. (20) - betão armado (150) – reb. (20)
26	reb. (20) - betão armado (200) – reb. (20)
27	reb. (20) - betão armado (250) – reb. (20)
28	reb. (20) - betão armado (150) - lâ rocha (40) - PGC (13)

Nº	Descrição
29	reb. (20) - betão armado (200) - lâ rocha (40) - PGC (13)
30	reb. (20) - betão armado (250) - lâ rocha (40) - PGC (13)
31	reb. (20) - EPS (40) - betão armado (150) – reb. (20)
32	reb. (20) - EPS (40) - betão armado (200) – reb. (20)
33	reb. (20) - EPS (40) - betão armado (250) – reb. (20)
34	reb. (10) - alv. (150) - impersom (50) - caixa de ar (60) - PGC (13)
35	reb. (10) - alv. (150) - impersom (40) - caixa de ar (70) - PGC (13)

Quadro 4.2 – Paredes Duplas.

Nº	Descrição
36	reb. (15) – alv. (110) – reb. (15) – Danofon (28) – alv. (110) – reb. (15)
37	reb. (15) – alv. (70) – reb. (15) - lâ de vidro (30) – alv. (70) – reb. (15)
38	reb. (15) – alv. (110) - reb (15) - lâ de vidro (30) – alv. (110) – reb. (15)
39	reb. (15) – alv. (150) - lâ mineral (40) – alv. (150) – reb. (15)
40	reb. (15) – alv. (150) - cr2c (18) - lâ mineral (40) – alv. (110) – reb. (15)
41	reb. (10) – alv. (70) – tecsound 2ft (22) – alv. (70) – reb. (10)
42	reb. (20) - alv. (70) - caixa de ar (30) - alv. (70) – reb. (20)
43	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - alv. (70) – reb. (20)
44	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - alv. (110) – reb. (20)
45	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - alv. (110) – reb. (20)
46	reb. (20) - alv. (110) - reb. (15) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (110) - reb. (20)
47	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (110) - reb. (20)
48	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (110) - reb. (20)
49	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (150) - reb. (20)
50	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - xps (40) - alv. (110) - reb. (20)
51	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - xps (40) - alv. (110) - reb. (20)
52	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (50) - xps (40) - alv. (110) - reb. (20)
53	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - xps (40) - alv. (150) - reb. (20)
54	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - icb (40) - alv. (110) - reb. (20)
55	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (10) - icb (40) - alv. (110) - reb. (20)
56	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (10) - corkoco (40) - alv. (110) - reb. (20)
57	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - icb (40) - alv. (150) - reb. (20)
58	reb. (15) - alv. (110) - reb. (10) - caixa de ar c/ regranulado negro de cortiça(60) - alv. (110) - reb. (15)
59	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar c/ regranulado negro de cortiça(50) - alv. (110) - reb. (20)
60	reb. (20) - alv. (110) - reb. (15) - caixa de ar (30) - lâ de vidro (30) - alv. (110) - reb. (20)
61	reb. (20) - alv. (150) - reb. (15) - caixa de ar (30) - lâ de vidro (30) - alv. (110) - reb. (20)
62	reb. (10) - alv. (150) - caixa de ar (35) – impersom (40) - caixa de ar (35) - alv. (150) - reb. (10)
63	reb. (10) - alv. (150) - caixa de ar (35) – impersom (40) - caixa de ar (35) - alv. (150) - reb. (10)
64	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (50) - xps (50) - alv. (110) - reb. (15)
65	reb. (15) - alv. (110) - reb. (10) -caixa de ar (60) - icb (40) - alv. (110) - reb. (15)

Quadro 4.3 – Paredes Leves.

Nº	Descrição
66	PGC (12,5) - lâ mineral (48) - PGC (12,5)
67	PGC (15) - lâ mineral (48) - PGC (15)
68	PGC (18) - lâ mineral (48) - PGC (18)
69	PGC (12,5) - lâ mineral (70) - PGC (12,5)

Nº	Descrição
70	PGC (15) - lã mineral (70) - PGC (15)
71	PGC (12,5) - lã mineral (90) - PGC (12,5)
72	PGC (15) - lã mineral (90) - PGC (15)
73	PGC (12,5) - caixa de ar (48) - PGC (12,5)
74	PGC (15) - caixa de ar (48) - PGC (15)
75	PGC (18) - caixa de ar (48) - PGC (18)
76	PGC (12,5) - caixa de ar (70) - PGC (12,5)
77	PGC (15) - caixa de ar (70) - PGC (15)
78	PGC (12,5) - caixa de ar (90) - PGC (12,5)
79	PGC (15) - caixa de ar (90) - PGC (15)
80	2xPGC (12,5) - lã mineral (48) - 2xPGC (12,5)
81	2xPGC (15) - lã mineral (48) - 2xPGC (15)
82	2xPGC (12,5) - lã mineral (70) - 2xPGC (12,5)
83	2xPGC (15) - lã mineral (70) - 2xPGC (15)
84	2xPGC (12,5) - lã mineral (90) - 2xPGC (12,5)
85	2xPGC (15) - lã mineral (90) - 2xPGC (15)
86	2xPGC (12,5) - caixa de ar (48) - 2xPGC (12,5)
87	2xPGC (15) - caixa de ar (48) - 2xPGC (15)
88	2xPGC (12,5) - caixa de ar (70) - 2xPGC (12,5)
89	2xPGC (15) - caixa de ar (70) - 2xPGC (15)
90	2xPGC (12,5) - caixa de ar (90) - 2xPGC (12,5)
91	2xPGC (15) - caixa de ar (90) - 2xPGC (15)
92	3xPGC (12,5) - lã mineral (70) - 3xPGC (12,5)
93	3xPGC (15) - lã mineral (70) - 3xPGC (15)
94	3xPGC (12,5) - lã mineral (90) - 3xPGC (12,5)
95	3xPGC (15) - lã mineral (90) - 3xPGC (15)
96	3xPGC (12,5) - caixa de ar (70) - 3xPGC (12,5)
97	3xPGC (15) - caixa de ar (70) - 3xPGC (15)
98	3xPGC (12,5) - caixa de ar (90) - 3xPGC (12,5)
99	3xPGC (15) - caixa de ar (90) - 3xPGC (15)
100	2xPGC (12,5) - 2xlã mineral (48) - 2xPGC (12,5)
101	2xPGC (15) - 2xlã mineral (48) - 2xPGC (15)
102	2xPGC (12,5) - 2xlã mineral (70) - 2xPGC (12,5)
103	2xPGC (15) - 2xlã mineral (70) - 2xPGC (15)
104	2xPGC (12,5) - 2xlã mineral (90) - 2xPGC (12,5)
105	2xPGC (15) - 2xlã mineral (90) - 2xPGC (15)
106	2xPGC (12,5) - lã mineral (48) - caixa de ar (54) - lã mineral (48) - 2xPGC (12,5)
107	2xPGC (15) - lã mineral (48) - caixa de ar (54) - lã mineral (48) - 2xPGC (15)
108	2xPGC (12,5) - lã mineral (48) - caixa de ar (14) - lã mineral (48) - 2xPGC (12,5)
109	2xPGC (15) - lã mineral (48) - caixa de ar (4) - lã mineral (48) - 2xPGC (15)
110	PGC(12,5+10) - caixa de ar (35) - fibra de coco (40) - PGC(12,5+10)
111	PGC (13) - caixa de ar (50) – impersom (50) - caixa de ar (50) - PGC (13)
112	2xPGC (13) - caixa de ar (25) - lã poliéster (45) - PGC (13) - imperacoustic (4) - PGC (13)
113	2xPGC (13) - caixa de ar (5) - lã vidro (65) - PGC (13) - imperacoustic (4) - PGC (13)
114	2xPGC (13) - caixa de ar (20) - lã rocha (50) - PGC (13) – imperacoustic (4) - PGC (13)
115	2xPGC (15) - lã vidro (92) - PGC (13) - imperacoustic (4) - PGC (13)
116	PGC (13) - caixa de ar (55) – impersom (40) - caixa de ar (55) - PGC (13)
117	2xPGC (13) - lã vidro (50) - tecsound s70 (3,8) - 2xPGC (13)
118	2xPGC (13) - lã vidro (50) - tecsound ft40 (14) - 2xPGC (13)
119	2xPGC (13) - tecsound sy50 (14) - lã rocha (70) - tecsound sy50(14) - 2xPGC (13)

Quadro 4.4 – Pavimentos.

Nº	Descrição
120	laje maciça de BA (140) - corkoco (40) - caixa de ar (350) - PGC (13)
121	camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210)
122	camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)
123	lajeta (40) - icb (40) - espuma polietileno (3) - camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)
124	laje betão armado (200)
125	laje betão armado (200) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)
126	lajeta (40) - icb (40) - espuma polietileno (3) - laje betão armado (200) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)
127	piso madeira (18) - viga de madeira (250x300) - PGC (12,5)
128	piso madeira (18) - viga de madeira (250x300) - caixa de ar (20) - lâ rocha (80) - 2xPGC (12,5)
129	tacos madeira (10) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)
130	mosaico cerâmico (5) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)
131	piso flutuante (6) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)
132	alcatifa (6) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)
133	laje (140) - caixa de ar (150) - impersom (50) - PGC (13)
134	laje aligeirada com blocos de 16 cm + 4 cm de betão
135	laje aligeirada com blocos de 20 cm + 5 cm de betão
136	laje aligeirada com blocos de 30 cm + 7 cm de betão
137	laje maciça de 15 cm
138	laje maciça de 20 cm
139	laje maciça de 30 cm

Quadro 4.5 – Revestimentos de Pavimento.

Nº	Descrição
140	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - betão leve (1 cimento, 2 areia, 5 regranulado cortiça) (70) - betão regularização (10) - laje betão (140)
141	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - betão leve (1 cimento, 2 areia, 5 regranulado cortiça) (70) - icb (20) - betão regularização (10) - laje betão (140)
142	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - TR FLOOR+ (5) - laje betão (140)
143	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de polietileno reticulado de 5 mm)
144	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de 15 mm tipo Aglomex da Flex2000)
145	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de 30 mm tipo Aglomex da Flex2000)
146	parquet flutuante - membrana de polietileno reticulado de 3 mm - laje betão (140)
147	pavimento Flutuante Acousticork® NRT Series 3000 - laje betão (140)
148	pavimento Flutuante Woodcomfort Floating WRT - laje betão (140)
149	pavimento Flutuante Xtreme WRT series 100 - laje betão (140)
150	pavimento Flutuante Xtreme WRT series 300 - laje betão (140)

Quadro 4.6 – Envidraçados.

Nº	Descrição
Vidro Normal:	
151	6+12+8
152	4
153	6
154	8+20+4

Nº	Descrição
155	8+20+6
156	8+50+4
157	8+50+6
158	8+100+4
159	8+100+6
160	3
161	4
162	5
163	6
164	8
165	10
166	12
167	15
168	19
169	6+6+4
170	10+6+4
171	10+12+4
172	4+6+4
173	4+12+4
174	4+16+4
175	6+12+6
176	4+12+8
177	4+16+8
178	6+12+10
179	4+12+4
180	4+15+4
181	4+16+4
182	6+12+6
183	6+15+6
184	6+16+6
185	4+10+6
186	4+12+8
187	4+16+8
Vidro Laminado:	
188	6
189	33.1A
190	44.1A
191	55.1A
192	66.1A
193	33.2A
194	44.2A
195	55.2A
196	66.2A
Vidro Normal Exterior e Laminado Interior:	
197	4+12+33.1A
198	6+12+33.1A
199	6+12+44.1A
200	8+12+44.1A
201	10+12+44.1 A
202	6+16+44.2A

Nº	Descrição
203	10+12+44.2A
Envidraçado com Caixilharia:	
204	vidro duplo 6+(10)+4 mm em caixilho tipo A3
205	vidro duplo 8+(12)+6 mm em caixilho tipo A3
206	vidro duplo 55.1+(12)+8mm em Caixilho C. A3
207	janela dupla com um vidro duplo 8+(10)+6mm + 2ª janela com vidro simples de 8 mm, em Caixilhos Classe A3

Nos quadros anteriores, de forma a não tornar as descrições das soluções demasiado extensas, optou-se pela utilização de abreviaturas.

As abreviaturas utilizadas foram as seguintes:

- alv – alvenaria;
- reb – reboco;
- icb – aglomerado negro de cortiça;
- PGC – placa de gesso cartonado
- EPS – poliestireno expandido moldado;
- XPS – poliestireno expandido extrudido;

Quadro 4.7 – Cumprimento Regulamentar

Nº	R _w (RRAE)		U (RCCTE)					
			Interior			Exterior		
	Interior	Exterior	I1	I2	I3	I1	I2	I3
1	x	Sim	x	x	x	-	-	-
2	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
3	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
4	x	Sim	Sim *	Sim	Sim	-	-	-
5	x	Sim	Sim *	Sim	Sim	-	-	-
6	x	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
7	x	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
8	x	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
9	x	Sim	-	-	-	x	x	x
10	x	Sim	-	-	-	x	x	x
11	x	Sim	-	-	-	Sim	x	x
12	x	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
13	Sim	Sim	-	-	-	x	x	x
14	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
15	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
16	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
17	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
18	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
19	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-

Nº	R _w (RRAE)		U (RCCTE)					
			Interior			Exterior		
	Interior	Exterior	I1	I2	I3	I1	I2	I3
20	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
21	x	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
22	x	Sim	x	x	x	-	-	-
23	x	Sim	x	x	x	-	-	-
24	x	Sim	x	x	x	-	-	-
25	x	Sim	x	x	x	-	-	-
26	x	Sim	x	x	x	-	-	-
27	Sim	Sim	x	x	x	-	-	-
28	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
29	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
30	Sim	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
31	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
32	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
33	Sim	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
34	x	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
35	x	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
36	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
37	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
38	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
39	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
40	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
41	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
42	x	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
43	x	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
44	x	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
45	Sim	Sim	-	-	-	Sim	Sim	Sim
46	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
47	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
48	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
49	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
50	x	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
51	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
52	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
53	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
54	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
55	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
56	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
57	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
58	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
59	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
60	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
61	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim
62	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
63	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
64	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim *
65	Sim	Sim	-	-	-	Sim *	Sim *	Sim

Nº	R _w (RRAE)		U (RCCTE)					
			Interior			Exterior		
	Interior	Exterior	I1	I2	I3	I1	I2	I3
66	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
67	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
68	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
69	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
70	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
71	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
72	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
73	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
74	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
75	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
76	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
77	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
78	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
79	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
80	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
81	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
82	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
83	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
84	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
85	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
86	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
87	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
88	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
89	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
90	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
91	x	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	-
92	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
93	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
94	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
95	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
96	x	Sim	Sim *	Sim	Sim	-	-	-
97	x	Sim	Sim *	Sim	Sim	-	-	-
98	x	Sim	Sim *	Sim	Sim	-	-	-
99	x	Sim	Sim *	Sim	Sim	-	-	-
100	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
101	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
102	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
103	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
104	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
105	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
106	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
107	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
108	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
109	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
110	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
111	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
112	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-

Nº	R _w (RRAE)		U (RCCTE)					
			Interior			Exterior		
	Interior	Exterior	I1	I2	I3	I1	I2	I3
113	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
114	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
115	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
116	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
117	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
118	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
119	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	-	-	-
120	Sim	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	Sim	Sim	Sim
121	x	Sim	x	x	x	x	x	x
122	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	Sim	Sim	Sim
123	Sim	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	Sim	Sim	Sim
124	x	Sim	x	x	x	x	x	x
125	Sim	Sim	Sim *	Sim *	Sim	Sim	Sim	x
126	Sim	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	Sim *	Sim	Sim
127	x	Sim	x	x	x	x	x	x
128	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	x	x	x
129	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	x	x	x
130	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	x	x	x
131	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	x	x	x
132	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	x	x	x
133	x	Sim	Sim *	Sim *	Sim *	Sim	Sim	Sim
134	x	Sim	x	x	x	x	x	x
135	x	Sim	x	x	x	x	x	x
136	x	Sim	x	x	x	x	x	x
137	x	Sim	x	x	x	x	x	x
138	x	Sim	x	x	x	x	x	x
139	Sim	Sim	x	x	x	x	x	x
151	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
152	x	x	-	-	-	- *	-	-
153	x	x	-	-	-	- *	-	-
154	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
155	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
156	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
157	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
158	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
159	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
160	x	x	-	-	-	- *	-	-
161	x	x	-	-	-	- *	-	-
162	x	x	-	-	-	- *	-	-
163	x	x	-	-	-	- *	-	-
164	x	x	-	-	-	- *	-	-
165	x	x	-	-	-	- *	-	-
166	x	x	-	-	-	- *	-	-
167	x	Sim	-	-	-	- *	-	-
168	x	Sim	-	-	-	- *	-	-
169	x	x	-	-	-	- *	- *	- *

Nº	R _w (RRAE)		U (RCCTE)					
			Interior			Exterior		
	Interior	Exterior	I1	I2	I3	I1	I2	I3
170	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
171	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
172	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
173	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
174	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
175	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
176	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
177	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
178	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
179	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
180	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
181	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
182	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
183	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
184	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
185	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
186	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
187	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
188	x	x	-	-	-	- *	-	-
189	x	x	-	-	-	- *	-	-
190	x	x	-	-	-	- *	-	-
191	x	x	-	-	-	- *	-	-
192	x	x	-	-	-	- *	-	-
193	x	x	-	-	-	- *	-	-
194	x	x	-	-	-	- *	-	-
195	x	x	-	-	-	- *	-	-
196	x	x	-	-	-	- *	-	-
197	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
198	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
199	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
200	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
201	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
202	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
203	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
204	x	x	-	-	-	- *	- *	- *
205	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
206	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *
207	x	Sim	-	-	-	- *	- *	- *

(-) Requisito regulamentar não aplicável ou inexistente.

(x) Incumprimento regulamentar.

(*) Cumpre valores de referência existentes no Quadro IX.3 do RCCTE.

Quadro 4.8 – Percentagem da diferença para os mínimo regulamentar e posição.

Nº	Posição	Ponderação Acústica					
		1x		1,5x		2x	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior
1	35	-	-	-	-	-	-
2	32	-	-	-	-	-	-
3	29	-	-	-	-	-	-
4	26	-	-	-	-	-	-
5	24	-	-	-	-	-	-
6	15	-	39%	-	37%	-	35%
7	16	-	40%	-	38%	-	37%
8	4	-	51%	-	48%	-	45%
9	34	-	-	-	-	-	-
10	33	-	-	-	-	-	-
11	31	-	-	-	-	-	-
12	11	-	32%	-	33%	-	34%
13	14	-	-	-	-	-	-
14	25	-	-	-	-	-	-
15	19	-	-	-	-	-	-
16	12	-	-	-	-	-	-
17	7	-	-	-	-	-	-
18	27	-	-	-	-	-	-
19	20	-	-	-	-	-	-
20	8	-	-	-	-	-	-
21	28	-	29%	-	28%	-	28%
22	30	-	-	-	-	-	-
23	22	-	-	-	-	-	-
24	17	-	-	-	-	-	-
25	23	-	-	-	-	-	-
26	18	-	-	-	-	-	-
27	13	-	-	-	-	-	-
28	21	-	-	-	-	-	-
29	5	-	-	-	-	-	-
30	2	32%	-	26%	-	22%	-
31	6	-	-	-	-	-	-
32	3	-	-	-	-	-	-
33	1	33%	-	26%	-	22%	-
34	9	-	50%	-	46%	-	44%
35	10	-	46%	-	43%	-	41%
36	23	-	-	-	-	-	-
37	28	-	-	-	-	-	-
38	25	-	-	-	-	-	-
39	20	-	-	-	-	-	-
40	26	-	-	-	-	-	-
41	30	-	-	-	-	-	-
42	29	-	23%	-	25%	-	27%
43	27	-	28%	-	30%	-	31%
44	24	-	32%	-	34%	-	35%
45	22	-	42%	-	44%	-	45%
46	15	-	56%	-	55%	-	54%

Nº	Posição	Ponderação Acústica					
		1x		1,5x		2x	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior
47	16	-	57%	-	55%	-	54%
48	5	-	58%	-	57%	-	56%
49	1	-	60%	-	59%	-	57%
50	19	-	55%	-	53%	-	51%
51	14	-	56%	-	54%	-	53%
52	13	-	57%	-	55%	-	54%
53	9	-	57%	-	55%	-	54%
54	18	-	56%	-	54%	-	54%
55	7	-	57%	-	56%	-	55%
56	11	-	57%	-	56%	-	55%
57	2	-	59%	-	58%	-	57%
58	6	-	58%	-	57%	-	56%
59	10	-	57%	-	56%	-	55%
60	17	-	55%	-	54%	-	53%
61	12	-	57%	-	56%	-	55%
62	3	-	60%	-	58%	-	57%
63	4	-	60%	-	58%	-	57%
64	8	-	58%	-	55%	-	54%
65	21	-	56%	-	54%	-	53%
66	44	-	-	-	-	-	-
67	43	-	-	-	-	-	-
68	38	-	-	-	-	-	-
69	36	-	-	-	-	-	-
70	30	-	-	-	-	-	-
71	28	-	-	-	-	-	-
72	23	-	-	-	-	-	-
73	52	-	-	-	-	-	-
74	49	-	-	-	-	-	-
75	48	-	-	-	-	-	-
76	53	-	-	-	-	-	-
77	50	-	-	-	-	-	-
78	54	-	-	-	-	-	-
79	51	-	-	-	-	-	-
80	32	-	-	-	-	-	-
81	29	-	-	-	-	-	-
82	22	-	-	-	-	-	-
83	19	-	-	-	-	-	-
84	18	-	-	-	-	-	-
85	15	-	-	-	-	-	-
86	45	-	-	-	-	-	-
87	39	-	-	-	-	-	-
88	46	-	-	-	-	-	-
89	40	-	-	-	-	-	-
90	47	-	-	-	-	-	-
91	42	-	-	-	-	-	-
92	13	-	-	-	-	-	-
93	10	-	-	-	-	-	-
94	5	-	-	-	-	-	-

Nº	Posição	Ponderação Acústica					
		1x		1,5x		2x	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior
95	3	-	-	-	-	-	-
96	35	-	-	-	-	-	-
97	31	-	-	-	-	-	-
98	37	-	-	-	-	-	-
99	33	-	-	-	-	-	-
100	16	-	-	-	-	-	-
101	7	-	-	-	-	-	-
102	9	-	-	-	-	-	-
103	2	-	-	-	-	-	-
104	8	-	-	-	-	-	-
105	1	-	-	-	-	-	-
106	12	-	-	-	-	-	-
107	4	-	-	-	-	-	-
108	14	-	-	-	-	-	-
109	6	-	-	-	-	-	-
110	25	-	-	-	-	-	-
111	34	-	-	-	-	-	-
112	20	-	-	-	-	-	-
113	17	-	-	-	-	-	-
114	24	-	-	-	-	-	-
115	11	-	-	-	-	-	-
116	41	-	-	-	-	-	-
117	27	-	-	-	-	-	-
118	26	-	-	-	-	-	-
119	21	-	-	-	-	-	-
120	5	21%	32%	17%	35%	15%	37%
121	16	-	-	-	-	-	-
122	9	-	26%	-	30%	-	32%
123	6	20%	30%	16%	33%	13%	35%
124	14	-	-	-	-	-	-
125	2	14%	-	12%	-	10%	-
126	1	32%	48%	26%	48%	23%	49%
127	20	-	-	-	-	-	-
128	15	-	-	-	-	-	-
129	7	-	-	-	-	-	-
130	11	-	-	-	-	-	-
131	8	-	-	-	-	-	-
132	12	-	-	-	-	-	-
133	10	-	38%	-	39%	-	40%
134	18	-	-	-	-	-	-
135	19	-	-	-	-	-	-
136	3	-	-	-	-	-	-
137	17	-	-	-	-	-	-
138	13	-	-	-	-	-	-
139	4	-	-	-	-	-	-
151	11	-	-	-	-	-	-
152	55	-	-	-	-	-	-

Nº	Posição	Ponderação Acústica					
		1x		1,5x		2x	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior
153	51	-	-	-	-	-	-
154	19	-	-	-	-	-	-
155	12	-	-	-	-	-	-
156	21	-	-	-	-	-	-
157	13	-	-	-	-	-	-
158	22	-	-	-	-	-	-
159	14	-	-	-	-	-	-
160	57	-	-	-	-	-	-
161	56	-	-	-	-	-	-
162	54	-	-	-	-	-	-
163	53	-	-	-	-	-	-
164	42	-	-	-	-	-	-
165	36	-	-	-	-	-	-
166	24	-	-	-	-	-	-
167	9	-	-	-	-	-	-
168	4	-	-	-	-	-	-
169	37	-	-	-	-	-	-
170	15	-	-	-	-	-	-
171	7	-	-	-	-	-	-
172	43	-	-	-	-	-	-
173	44	-	-	-	-	-	-
174	45	-	-	-	-	-	-
175	23	-	-	-	-	-	-
176	25	-	-	-	-	-	-
177	26	-	-	-	-	-	-
178	27	-	-	-	-	-	-
179	46	-	-	-	-	-	-
180	47	-	-	-	-	-	-
181	48	-	-	-	-	-	-
182	28	-	-	-	-	-	-
183	29	-	-	-	-	-	-
184	30	-	-	-	-	-	-
185	38	-	-	-	-	-	-
186	31	-	-	-	-	-	-
187	32	-	-	-	-	-	-
188	52	-	-	-	-	-	-
189	50	-	-	-	-	-	-
190	41	-	-	-	-	-	-
191	35	-	-	-	-	-	-
192	20	-	-	-	-	-	-
193	49	-	-	-	-	-	-
194	40	-	-	-	-	-	-
195	33	-	-	-	-	-	-
196	17	-	-	-	-	-	-
197	34	-	-	-	-	-	-
198	18	-	-	-	-	-	-
199	10	-	-	-	-	-	-
200	6	-	-	-	-	-	-

Nº	Posição	Ponderação Acústica					
		1x		1,5x		2x	
		Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior
201	5	-	-	-	-	-	-
202	8	-	-	-	-	-	-
203	3	-	-	-	-	-	-
204	39	-	-	-	-	-	-
205	16	-	-	-	-	-	-
206	2	-	-	-	-	-	-
207	1	-	-	-	-	-	-

(-) Requisitos regulamentares do RRAE e/ou do RCCTE não aplicáveis ou não cumprimento dos requisitos mínimos de um dos regulamentos.

Com o objectivo de comprovar a fiabilidade do modelo de cálculo utilizado na previsão do isolamento sonoro a sons aéreos elaborou-se as figuras 4.1 e 4.2.

A Figura 4.1 é composta por um gráfico onde estão representadas as diferenças do índice de isolamento sonoro a sons de aéreos registadas entre os valores fornecidos pelas “Fontes” e o valor obtido pelas expressões de cálculo 2.58 e 2.59.

A Figura 4.2 também é composta por um gráfico mas neste caso compara-se os valores obtidos pelas expressões de cálculo do Modelo Misto de Meisser revisto por Mateus e Tadeu, 2.58 e 2.59, e os valores fornecidos pela “Fonte”. Este gráfico permite assim elaborar a linha de tendência da comparação entre estes dois valores e verificar se os valores se afastam muito ou não desta linha de tendência.

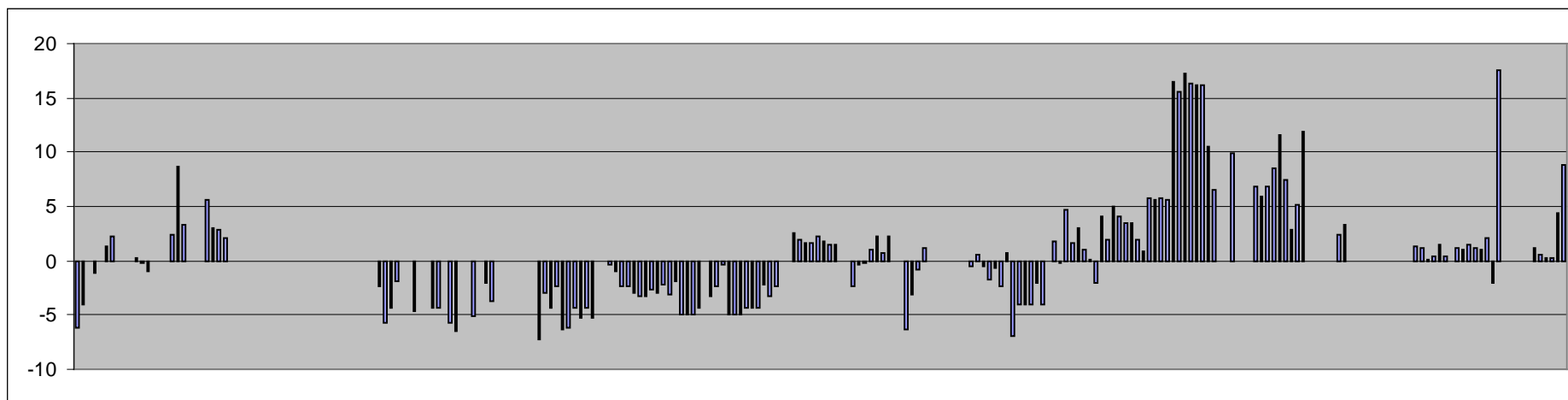


Figura 4.1 – Gráfico da diferença entre o valor teórico (calculado) e o valor dado pelo fornecedor ou obtido *in situ* (experimental) do R_w .

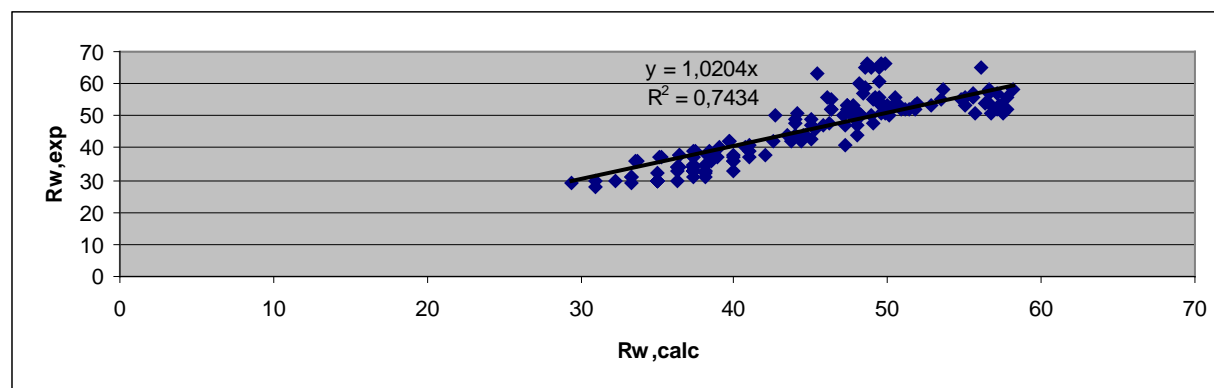


Figura 4.2 – Gráfico comparativo entre o valor teórico e o valor experimental de R_w .

5. Análise de Resultados

Após a elaboração do capítulo Cálculo de Soluções Construtivas e dos Anexos é possível proceder à análise dos resultados obtidos.

Esta análise será feita por grupo de soluções e terá por base os quadros e figuras realizados no capítulo anterior.

- **Paredes Simples**

No grupo das paredes simples foram consideradas todas as soluções construtivas constituídas apenas por um pano de alvenaria.

Sabendo que estas paredes de alvenaria são, na maioria dos casos, constituídas por elementos vazados, ou seja por elementos não maciços, como o tijolo cerâmico, blocos de betão ou blocos de argila, entre outros, estes possuem massas superficiais muito baixas o que prejudica, como é perceptível pelos parâmetros necessários das expressões 2.58 e 2.59, o nível de isolamento acústico a sons aéreos do elemento considerado. Este facto é bem perceptível no Quadro 4.7.

No Quadro 4.7, que apresenta os cumprimentos regulamentares, pode-se verificar que as únicas soluções construtivas deste grupo que cumprem os mínimos regulamentares para envolvente interior são as soluções: 13, 27, 30 e 33.

A solução 13 representa uma parede de alvenaria de pedra com 40 cm de espessura e as soluções 27, 30 e 33 representam soluções que tem por base uma parede de betão com 25 cm de espessura.

Todas as soluções que cumpriram o RRAE como parede de envolvente interior são paredes espessas e bastante compactas, logo, e como já tinha sido referido, são paredes com uma elevada massa superficial.

Apesar de estas terem sido as únicas a cumprir o regulamento para paredes de envolvente interior convém lembrar que os limites impostos pelo RRAE foram aumentados em 5 dB porque as expressões utilizadas no cálculo do índice de isolamento sonoro a sons aéreos não permitem a contabilização das transmissões marginais, logo atribui-se por defeito um incremento regulamentar de 5dB, para tentar compensar o facto de não serem consideradas as transmissões na expressão de cálculo.

Se se considerar que a parede foi executada em condições óptimas, ou seja de forma a minimizar os efeitos das transmissões marginais, o valor do R_w a considerar, para paredes de envolvente interior, no limite, pode ser de 50 dB para que cumpra os limites regulamentares do RRAE.

Ao considerar-se como valor limite os 50 dB verifica-se que existem 19 soluções das 35 estudadas que conseguiriam cumprir, teoricamente, este limite regulamentar. Deste modo pode-se verificar o impacto que os 5 dB considerados para as transmissões marginais têm no cumprimento regulamentar.

Das soluções que cumprem o limite regulamentar dos 50 dB não existe nenhuma solução de parede simples de alvenaria de tijolo cerâmico. As soluções de tijolo cerâmico que conseguem cumprir este limite regulamentar têm de ser complementadas com algum tipo de isolamento acústico ou por uma placa de gesso cartonado. Deste facto pode-se concluir que em obra, devido aos erros construtivos que ocorrem, é muito arriscado continuar a adoptar como paredes da envolvente interior panos simples de alvenaria de tijolo cerâmico.

Quanto ao limite imposto pelo RRAE para elementos da envolvente exterior verifica-se que todas as soluções cumprem este limite, mesmo considerando os 5dB das transmissões marginais.

Embora todas as soluções analisadas cumpram os mínimos regulamentares para paredes de envolvente exterior não nos podemos esquecer que as descontinuidades normalmente existentes nos elementos da envolvente exterior, como as grelhas de ventilação, caixas de estore, envidraçados, entre outros, fazem baixar bastante o nível de isolamento sonoro a sons de condução aérea destes elementos, como foi referido e explicado no capítulo 2.3.3. Logo é aconselhável em projecto definir-se convenientemente todos os métodos e soluções construtivas que se irão adoptar de forma a conseguir-se prever correctamente o nível de isolamento sonoro das soluções adoptadas e assim minimizar-se as diferenças existentes entre as medições realizadas *in situ* e os valores de projecto.

No Quadro 4.7, além dos índices de isolamento sonoro a sons de aéreos, também é avaliado o cumprimento regulamentar imposto pelo RCCTE.

Neste quadro é avaliado o cumprimento das soluções, tendo em conta o seu tipo de envolvente, quanto ao coeficiente de transmissão térmica, U.

Pela visualização deste quadro pode-se concluir que a maioria das soluções analisadas conseguem cumprir o limite regulamentar, apenas as soluções 1, 9, 10, 13, 22, 23, 24, 25, 26 e 27 não conseguem cumprir o regulamento qualquer que seja a zona climática de Inverno considerada e a solução 11 apenas consegue cumprir o mínimo regulamentar para a zona climática I1, que é a zona climática menos exigente termicamente, a nível regulamentar.

Das soluções que não cumprem os limites regulamentares do RCCTE e que pertencem ao grupo das soluções de envolvente interior, verifica-se que estas ou são soluções com pouca espessura, como é o caso da solução 1, ou são soluções de betão armado sem qualquer tipo de isolamento térmico/acústico, como é o caso das soluções 22, 23, 24, 25 e 26.

Nas soluções que pertencem ao grupo das de envolvente exterior e que não cumprem o regulamento verifica-se que estas, apesar de terem uma espessura bem razoável, ou são soluções com base em blocos de argila expandida, soluções 9, 10 e 11, ou a solução de alvenaria de pedra.

Apesar de as outras soluções de parede simples do tipo exterior cumprirem o regulamento convém lembrar que não é aconselhável o seu uso na envolvente exterior devido, sobretudo, aos problemas de infiltrações e condensações internas que ocorrem com maior facilidade neste tipo de paredes.

Uma vez que o RCCTE atribui valores de referência, facilitando a escolha de soluções construtivas em projecto que permitam o posterior cumprimento do RCCTE, foi efectuado também neste Quadro 4.7 o registo das soluções que cumpriam os valores de referência existentes no RCCTE para o coeficiente de transmissão térmica.

Para as soluções de envolvente interior verifica-se que as paredes de alvenaria de tijolo cerâmico apenas cumprem os valores de referência para a zona climática de Inverno I1 se tiverem como espessura 20 ou 22 cm, ou seja 20 cm ou mais, para as restantes zonas climáticas, mais exigentes a nível regulamentar, todas as soluções de alvenaria de tijolo analisadas nesta dissertação não cumprem estes valores de referência. As restantes soluções analisadas são na sua maioria complementadas com algum tipo de isolamento térmico/acústico o que permite a verificação dos valores de referência para qualquer zona climática, com a excepção para as soluções 14, 15 e 16 que não apresentam qualquer tipo de isolamento e que ainda assim cumprem os valores de referência existentes no RCCTE.

Do Quadro 4.7 pode-se concluir que as soluções analisadas de paredes simples para uso exterior não são recomendadas uma vez que só muito dificilmente conseguem cumprir os mínimos regulamentares existentes no RCCTE e que por serem soluções simples são mais susceptíveis de permitirem o aparecimento de patologias graves no seu lado interior, como as condensações internas e todos os problemas inerentes a esta. As soluções analisadas de paredes simples para o uso na envolvente interior quando acompanhadas de um isolamento térmico/acústico demonstraram que a nível térmico são eficazes, uma vez que cumpriam os mínimos regulamentares e os valores de referência, embora a inércia térmica do elemento seja prejudicada. Contudo as soluções não cumprem os mínimos regulamentares exigidos no RRAE, com excepção para as soluções 13, 27, 30, 33, quando se considera um acréscimo regulamentar de 5dB.

Para o caso onde esse acréscimo de 5 dB devido às transmissões marginais não existia, verificou-se que houve mais soluções a cumprir as exigências regulamentares do RRAE, o que demonstra a importância que as transmissões marginais podem ter no cumprimento, ou não, do RRAE.

As soluções 13, 27, 30, 33 apesar de cumprirem os mínimos regulamentares do RRAE são soluções pesadas e uma delas já se encontra em desuso, a solução 13, e as restantes, por serem soluções pesadas, são normalmente usadas em zonas onde é necessário paredes resistentes e não em zonas onde é necessário apenas construir uma divisória, seja ela entre uma zona interior e uma zona exterior ou entre duas zonas interiores.

Após a análise do cumprimento regulamentar feito a partir do Quadro 4.7 vai-se analisar agora os valores obtidos no Quadro 4.8.

Neste quadro é possível verificar que as soluções que aparecem melhor classificadas na coluna da “Posição” são as soluções 33, 30, 32, 8, 29, 31, 17, 20, 34 e 35, por ordem decrescente.

Pela visualização desta coluna e das soluções que apresentam as melhores posições é perceptível que as soluções são tanto melhores quanto mais espessas forem, uma vez que diminuem a condutância térmica, aumentam a inércia térmica e aumentam o índice de isolamento sonoro a sons aéreos, comparativamente a elementos mais delgados do mesmo tipo, e quanto maior for a sua massa superficial porque aumenta as suas qualidades acústicas, e quanto melhor e mais espesso for o seu isolamento térmico/acústico que complementa estes panos de parede, apesar de poder prejudicar a inércia térmica do elemento, como na solução 34 e 35, porque reforça as suas propriedades térmicas e acústicas.

Na coluna da “Ponderação Acústica” aparece, para os elementos que cumprem ambos os regulamentos, a percentagem para os mínimos regulamentares devidamente ponderados, como já foi explicado anteriormente.

Através desta coluna da “Ponderação Acústica” percebe-se que, com a excepção da solução 12, nas soluções de parede simples é mais difícil cumprir os mínimos regulamentares do RRAE do que os mínimos regulamentares do RCCTE isto porque com o aumento da ponderação acústica, ou seja da importância da diferença existente entre o valor do índice de isolamento acústico para sons aéreos e o mínimo regulamentar existente no RRAE, verifica-se a diminuição da percentagem da diferença para os mínimos regulamentares.

Esta diminuição da diferença é tanto maior quanto mais “desequilibrada” é a solução entre o isolamento térmico e acústico, ou seja, por exemplo a solução 34 tem um óptimo comportamento térmico, uma baixa condutibilidade térmica, contudo o seu comportamento acústico, comparativamente com o térmico, é muito mau, logo com o aumento da importância do comportamento acústico (ponderação acústica), os valores da percentagem da diferença vão tender a diminuir mais abruptamente. Das soluções analisadas, aquelas que apresentam maiores diferenças de comportamento são constituídas por betão armado com isolamento térmico/acústico.

A solução 12 é a única solução que aumenta as suas percentagens com o aumento da ponderação acústica, o que quer dizer que é uma solução muito melhor do ponto de vista acústico que do ponto de vista térmico.

Desta coluna do Quadro 4.8 pode-se concluir que as soluções mais “equilibradas” são as soluções 4, 34 e 35, por ordem decrescente, por estas apresentarem as maiores percentagens e o menor decrescimento de percentagem com o aumento da ponderação acústica.

Para além dos quadros já analisados parece oportuno aproveitar o facto de existirem vários materiais com propriedades diferentes mas com espessuras iguais ou muito semelhantes e comparar, para cada espessura, as suas propriedades térmicas e acústicas.

Assim surge o Quadro 5.1 com a descrição dessas soluções e as respectivas características.

Quadro 5.1 – Comparação das características de materiais construtivos com espessura iguais/semelhantes.

Nº	Tipo de Alvenaria	Espessura Alvenaria [mm]	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	R [m ² .°C/ W]
2	Tijolo Cerâmico	110	47	0,302
9	Argila Expandida	110	51	0,285
3	Tijolo Cerâmico	150	48	0,420
10	Argila Expandida	150	47	0,330
14	Tijolo Cerâmico de Furação Vertical	140	48	0,815
22	Betão Armado	150	52	0,059
4	Tijolo Cerâmico	200	48	0,553
11	Argila Expandida	200	48	0,455
15	Tijolo Cerâmico de Furação Vertical	190	49	0,930
23	Betão Armado	200	54	0,080
12	Argila Expandida	250	53	0,739
16	Tijolo Cerâmico de Furação Vertical	240	50	1,110
24	Betão Armado	250	54	0,100

No Quadro 5.1 aparece uma característica que não aparece no anexo A.1. Esta característica é a resistência térmica das soluções, R.

A resistência térmica, ao contrário do U, permite comparar o nível de isolamento que estas soluções apresentam independentemente do seu tipo de envolvente, isto porque não se

contabiliza a resistência térmica superficial interior, R_{si} , nem a resistência térmica superficial exterior, R_{se} .

O cálculo da resistência térmica foi efectuado a partir do que foi explicado no capítulo 3.3.2 para a resistência térmica.

O valor de resistência térmica, contrariamente ao que acontece com o valor do coeficiente de transmissão térmica, é tanto melhor quanto maior for o seu valor.

Do Quadro 5.1 consegue-se concluir que entre os vários materiais analisados o que apresenta melhores características térmicas e acústicas, para qualquer espessura, é o tijolo cerâmico de furação vertical. Este quadro também permite concluir que o betão armado é uma solução com um bom desempenho de isolamento acústico a sons aéreos, contudo é a pior solução a nível de desempenho térmico, uma vez que apresenta uma resistência térmica muito baixa.

Como conclusão geral pode-se dizer que as paredes de apenas um pano passam a ser utilizadas, essencialmente, como paredes divisórias do interior de uma mesma fracção porque a aplicação destas noutros locais, envolvente interior ou exterior, irá dificultar a aprovação regulamentar ao nível do RCCTE em projecto e a probabilidade destas soluções não cumprirem os limites regulamentares do RRAE *in situ* também são elevadas, uma vez que, ainda que algumas cumpram os limites regulamentares calculados nesta dissertação, em obra ocorrem alguns erros construtivos que podem prejudicar o índice de isolamento sonoro e assim condicionar a aprovação ao nível do RRAE.

Embora não se recomende o uso deste tipo de paredes, em alguns locais não se pode evitar o recurso a estas, como nas caixas de elevador, pelo que se recomenda, nestes casos, ao uso de algum tipo de isolamento térmico/acústico de forma a minimizar o efeito prejudicial da sua utilização, quer a nível térmico, quer a nível acústico.

- **Paredes Duplas**

As soluções de paredes duplas correspondem a soluções que sejam constituídas por dois panos, ainda que entre estes não exista qualquer tipo de caixa-de-ar, o que não é recomendável executar em paredes da envolvente exterior.

À semelhança das paredes simples, nas soluções de paredes duplas foi inicialmente feito um estudo sobre as suas características térmicas e acústicas, dando origem ao anexo A.2.

Este anexo serviu de base para a elaboração do Quadro 4.7 e do Quadro 4.8.

No Quadro 4.7, e como também já foi explicado, apresenta-se o cumprimento regulamentar das soluções analisadas.

Após a visualização da coluna do índice de isolamento sonoro a sons aéreos, R_w , é facilmente perceptível, pela quantidade de “Sim” existentes, comparativamente com os existentes para as paredes simples, que este tipo de soluções permitem cumprir com mais facilidade os mínimos regulamentares exigidos pelo RRAE.

Das 30 soluções analisadas deste grupo apenas 10 não conseguem cumprir os mínimos regulamentares do RRAE para envolvente interior, considerando o efeito das transmissões marginais.

Destas 10 soluções que não cumprem os mínimos regulamentares, seis não possuem caixa-de-ar não preenchida, três não possuem qualquer tipo de isolamento térmico/acústico e uma possui XPS como isolamento térmico no interior da sua caixa-de-ar.

De todas as soluções analisadas neste grupo verificou-se que as únicas que possuíam caixa-de-ar totalmente preenchida, as seis soluções referidas anteriormente, não cumpriram o regulamento para a envolvente interior, pelo que se pode deduzir que uma caixa-de-ar não preenchida pode ser bastante importante como forma de melhorar as características de isolamento acústico da solução. Contudo esta questão será estudada mais à frente com maior rigor.

As três soluções que não cumpriram o RRAE e que tinham caixa-de-ar, solução 42, 43, 44, não continham no seu interior nenhum tipo de isolamento, o que associado a uma baixa massa superficial, devido ao facto de serem utilizados na sua composição tijolos cerâmicos furados, faz com que estas soluções não cumpram o regulamento.

Por fim à que notar ainda que a solução 50 também não cumpre os mínimos regulamentares e que já apresenta no seu interior um tipo de isolamento, o XPS, contudo se se comparar o resultado obtido para o isolamento acústico a sons aéreos da solução 44 e 50, 53 e 55 dB(A), respectivamente, e tendo em conta que apenas diferem na espessura da caixa-de-ar devido à implementação do XPS facilmente se percebe que este tipo de isolamento não tem qualquer tipo de propriedade acústica, apenas aumenta o isolamento sonoro em 2dB, e que se deve em grande parte ao aumento da espessura da caixa-de-ar de 30mm para 70mm.

Embora se tenha considerado um incremento de 5dB(A) no índice de isolamento sonoro a sons aéreos devido ao efeito das transmissões marginais, como já foi anteriormente explicado, volta a ser pertinente referir que se este efeito conseguisse ser minimizado ou se no limite conseguisse ser eliminado, faria com que apenas duas das 30 soluções analisadas não cumprissem o regulamento, sendo que uma delas, a solução 41, é composta por um material com propriedades acústicas, tecsound 2ft, que pode não estar a ser correctamente analisado pela expressão utilizada para aferir o R_w . Se se considerar como verdadeiro o valor dado pelo fabricante, esta também passa o regulamento, ficando apenas uma solução por cumprir o regulamento, a solução 37.

Quanto ao cumprimento regulamentar, a nível acústico, como envolvente exterior, todas as soluções cumprem o regulamento, o que seria de esperar visto que as soluções que não cumpriram o regulamento para a envolvente interior se aproximaram bastante do valor mínimo regulamentar e porque os limites regulamentares para a envolvente exterior são muito inferiores aos da envolvente interior, ou seja é menos exigente. Desta coluna volta-se a não conseguir retirar grandes conclusões uma vez que o índice global de isolamento da parede vai depender, à semelhança do que foi dito para as paredes simples, dos tipos e áreas dos elementos que constituem a parede exterior.

Após a análise feita das soluções relativamente ao cumprimento do RRAE irá ser feita de seguida a análise ao cumprimento do RCCTE.

Quanto ao cumprimento dos mínimos regulamentares existentes no RCCTE por parte das soluções de paredes duplas, pode-se afirmar que todas elas cumprem os mínimos regulamentares exigidos. Contudo, no que se refere ao cumprimento dos valores de referência, nem todas as soluções conseguem cumpri-los.

Das soluções apresentas, as soluções 42, 43, 44 e 45 não cumprem os valores de referência estipulados no RCCTE para nenhuma zona climática de Inverno. As soluções 46, 47, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61 e 65 não cumprem os valores de referência apenas para a zona climática I3, a zona climática mais exigente.

As soluções 42, 43, 44 e 45 são as únicas soluções, das analisadas nesta dissertação, que não possuem no interior da sua caixa-de-ar qualquer tipo de isolamento térmico/acústico e também são as únicas que não cumprem os mínimos de referência para todas as zonas climáticas de Inverno, pelo que se pode deduzir que para o cumprimento do RCCTE é conveniente adoptar, para paredes da envolvente exterior, apenas soluções com algum tipo de isolamento térmico. Caso não se adopte soluções com isolamento térmico vai-se dificultar a passagem regulamentar no RCCTE do edifício/fracção autónoma.

Uma vez que as soluções 46, 47, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61 e 65 não cumprem os valores de referência apenas para a zona climática I3, pode-se referir que caso se tente adoptar estas soluções numa zona climática I3 é aconselhável substituição do isolamento térmico por um mais espesso para que a solução cumpra posteriormente o valor de referência existente no regulamento e assim facilitar a passagem regulamentar.

Após analisar os valores obtidos no Quadro 4.7 vai-se analisar agora os valores obtidos no Quadro 4.8.

No Quadro 4.8 na coluna “Posição” pode-se verificar que as melhores soluções, por ordem decrescente, são: 49, 57, 62, 63, 48, 58, 55, 64, 53, 59.

Das soluções melhor classificadas na coluna das posições verifica-se que todas elas são de envolvente exterior, que estas são constituídas por pelo menos um pano de alvenaria de

tijolo de 15 cm, sendo o outro pano de 15 ou de 11 cm (com excepção para a solução 58 que apresenta dois panos de tijolo 11cm). Além das soluções apresentarem, na sua maioria, uma espessura considerável, estas possuem na sua caixa-de-ar uma zona totalmente vazada, ou seja sem nada a preencher esse espaço, com excepção para as soluções 58 e 59 que possuem regranulado de cortiça no seu interior, e todas elas possuem isolamento térmico/acústico no seu interior.

Por este quadro é perceptível que as soluções com caixa-de-ar, espessas e que tenham isolamento no seu interior têm maiores probabilidades de cumprir ambos os regulamentos que as outras.

Se se visualizar apenas as soluções de envolvente interior, verifica-se que a solução 39 é a melhor uma vez que apresenta o maior índice de isolamento acústico a sons aéreos e apresenta a menor condutibilidade térmica.

Através do Quadro 4.8 mas agora a partir da coluna da “Ponderação Acústica” é possível verificar um aumento da percentagem da diferença regulamentar com o aumento da ponderação acústica nas soluções 42, 43, 44 e 45. Este facto indica que estas soluções apresentam uma maior diferença para os limites regulamentares do RRAE que do RCCTE, ou seja estas soluções têm um comportamento acústico melhor que o comportamento térmico a nível regulamentar.

As restantes soluções apresentam uma diminuição da sua percentagem com o aumento da ponderação acústica, o que significa que estas têm um comportamento térmico superior ao acústico, a nível regulamentar.

Apesar das soluções não terem o mesmo comportamento com o aumento da ponderação acústica, todas elas apresentam para este aumento de ponderação uma diferença entre os 1% e 2% o que demonstra o “equilíbrio” que estas soluções têm a nível acústico e térmico aos olhos da legislação.

Por último, sobre o Quadro 4.8, há que referir que as soluções que apresentam um maior “equilíbrio” são as soluções 49, 62 e 63 por apresentarem os maiores valores percentuais e por estes diminuírem apenas 3% com a passagem da ponderação acústica de 1x para 2x.

De forma a avaliar o efeito que os vários isolamentos térmicos/acústicos podem ter sobre uma solução construtiva são apresentadas no Quadro 5.2 as variações do comportamento térmico e acústico de uma solução com a variação do seu isolamento térmico/acústico.

Quadro 5.2 – Variação das características com a variação de isolamento.

Nº	Isolamento [mm]	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	U [W/m ² .°C]
44	-	53	1,09
47	lã rocha [40]	57	0,52
50	XPS [40]	55	0,50
54	icb [40]	57	0,55

Do quadro anterior é evidente que os isolamentos com base em materiais fibrosos, como a lã de rocha, icb, regranulado de cortiça ou lã de vidro, conferem mais isolamento acústico a uma parede do que um isolamento não fibroso, como o XPS.

Como se pode constatar pelo Quadro 5.2 os isolamentos fibrosos têm características térmicas e acústicas muito semelhantes, conferindo à parede sensivelmente o mesmo índice de isolamento térmico e acústico. O XPS, apesar de conferir à parede mais isolamento térmico que no caso dos isolamentos fibrosos, este não confere à parede um acréscimo relevante de isolamento acústico.

- **Paredes Leves**

Nesta dissertação, além das paredes simples e duplas, também foram analisadas algumas soluções de paredes leves.

Este tipo de parede, como o próprio nome indica, são paredes de fraca resistência e que não deverão ser colocadas como envolvente interior e muito menos como envolvente exterior. Estas deverão ser aplicadas como divisórias de compartimentação interior das habitações.

Apesar de não ser aconselhável o seu uso na envolvente, estas poderão servir de complemento a soluções mais resistentes, como as soluções analisadas nesta dissertação de paredes simples e duplas, ou seja poderão servir de reforço de isolamento térmico ou acústico de uma outra solução.

Para permitir aferir quais as soluções de paredes leves que apresentam melhores características foi efectuado um estudo semelhante ao realizado nas paredes simples e duplas.

No Quadro 4.7 é feita a análise de cumprimento regulamentar quanto ao RRAE e quanto ao RCCTE.

Da visualização do quadro é perceptível que não existe nenhuma solução com características acústicas suficientes para permitir a passagem no RRAE para a envolvente interior. Para a envolvente exterior todas as soluções cumprem o regulamento mas recorde-se que estas além de não serem aplicadas como qualquer tipo de envolvente também não

estão aqui contabilizadas as possíveis aberturas que a parede poderia vir a ter. Ou seja a coluna do cumprimento regulamentar do índice de isolamento acústico a sons aéreos apenas nos informa que todas as soluções analisadas neste grupo têm um índice de isolamento acústico entre os 38 dB(A) e os 55 dB(A).

Pelas mesmas razões explicadas para o cumprimento do RRAE, a coluna do cumprimento do RCCTE serve apenas para informar quais as soluções que apresentam um coeficiente de transmissão térmica inferior, para cada zona climática, aos limites regulamentares, ou seja informar sobre a qualidade térmica destas soluções. Da análise a esta coluna conclui-se que este tipo de soluções apresenta boas qualidades térmicas, uma vez que não há nenhuma que não cumpra os mínimos regulamentares do RCCTE.

Uma vez que não existe nenhuma solução que cumpra ambos os regulamentos, a coluna da “Ponderação Acústica” do Quadro 4.8 não nos fornece qualquer tipo de informação. Contudo neste quadro a coluna da “Posição” permite visualizar quais as melhores soluções analisadas.

As melhores soluções analisadas, por ordem decrescente, são: 105, 103, 95, 107, 94, 109, 101, 104, 102 e 93.

As soluções que se destacaram neste grupo pelo seu desempenho térmico e acústico são todas elas constituídas por mais que uma placa de gesso cartonado em cada pano e possuem todas um isolamento térmico/acústico no seu interior. O que demonstra, como seria de esperar, que quanto maior for a espessura das placas de gesso cartonado, quanto mais camadas tiver e quanto melhor for o isolamento utilizado melhores serão as características térmicas e acústicas da solução.

Para avaliar a melhoria de isolamento acústico e térmico das soluções analisadas são feitas algumas comparações entre as várias soluções.

No Quadro 5.3 é feito a comparação entre soluções com placas de gesso cartonado de 12,5mm e 15mm, respectivamente, variando o seu tipo de preenchimento e espessura da caixa-de-ar.

Quadro 5.3 – Comparação entre placas de gesso cartonado de 12,5 mm e placas de 15 mm.

Nº	Isolamento [mm]	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	U [W/m ² .°C]
66	lã mineral [48]	42	0,64
69	lã mineral [70]	44	0,47
73	caixa-de-ar [48]	40	1,85
76	caixa-de-ar [70]	40	1,85
67	lã mineral [48]	43	0,63

Nº	Isolamento [mm]	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	U [W/m ² .°C]
70	lã mineral [70]	45	0,47
74	caixa-de-ar [48]	41	1,79
77	caixa-de-ar [70]	41	1,79

A partir do Quadro 5.3 é possível perceber que é preferível ter uma caixa-de-ar, em paredes leves, com menor espessura mas preenchida com um isolante, que ter uma caixa-de-ar mais espessa sem qualquer tipo de isolamento no seu interior porque esta caixa-de-ar além de conferir um menor isolamento térmico também vai conferir um menor isolamento acústico.

Para avaliar o efeito nas características térmicas e acústicas do aumento da espessura das placas de gesso cartonado é elaborado o Quadro 5.4.

No Quadro 5.4 é feita a comparação para uma solução de placas de gesso cartonado e lã mineral de 48mm no seu interior onde se varia a quantidade de placas de gesso cartonado, em cada pano.

Quadro 5.4 – Comparação das características térmicas e acústicas de uma solução com o mesmo isolamento térmico mas com diferentes camadas de PGC.

Nº	Espessura PGC [mm]	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	U [W/m ² .°C]
69	1x12,5	44	0,47
82	2x12,5	47	0,45
92	3x12,5	50	0,43

Pela observação do Quadro 5.4 é bem perceptível a influência que tem o aumento das camadas das placas de gesso cartonado em cada pano da solução, essencialmente nas características acústicas. O aumento de cada camada de placa de gesso cartonado contribui, neste caso, com um aumento do índice de isolamento sonoro em 3dB, o que é bastante significativo, tendo em conta a espessura que cada placa tem.

A nível térmico a diferença que a colocação de mais uma placa de gesso cartonado tem no coeficiente de transmissão térmica é de 0,02 W/m².°C, o que não é muito significativo.

Como este tipo de placa é, comumente, utilizado como reforço de isolamento acústico e não térmico, pode-se afirmar que este tipo de solução é bastante funcional uma vez que permite, de forma simples e eficaz, aumentar o isolamento acústico de uma solução já

existente sem grandes encargos adicionais, uma vez que é uma solução de fácil implementação.

No grupo das paredes leves há que referir ainda as divergências encontradas entre os valores de R_w fornecidos pelo fornecedor/fabricante e os valores calculados, principalmente nas soluções que possuíam também isolamentos com características acústicas específicas.

A divergência existente entre estes dois valores deve-se sobretudo à dificuldade de encontrar expressões semelhantes que reflectam o isolamento acústico conferido por soluções de baixa massa superficial, como é este o caso, e soluções de elevada massa superficial e devido também ao surgimento de materiais tecnologicamente mais avançados que conferem maiores isolamentos acústicos que os dados por estas expressões.

- **Pavimentos**

Após terem sido feitas as análises de várias soluções de paredes vai-se analisar, agora, as soluções de pavimentos definidas nesta dissertação.

As características das soluções de pavimentos encontram-se divididas em dois anexos diferentes devido à dificuldade que se encontrou em conseguir expor todas as características, térmicas e acústicas, num só quadro. Um dos anexos, A.4.1, apresenta as características térmicas das soluções e o outro anexo, A.4.2, apresenta as características acústicas.

Com base nos valores obtidos nestes anexos, A.4.1 e A.4.2, realizou-se o Quadro 4.7.

Através da coluna do " R_w " do Quadro 4.7 é perceptível, mais uma vez, a dificuldade em encontrar soluções que consigam cumprir com facilidade os valores impostos no RRAE. Para as soluções de pavimentos apenas se conseguiu encontrar cinco soluções em 20 que cumprissem os mínimos regulamentares para o índice de R_w para elementos de envolvente interior. Os limites regulamentares de R_w para elementos de envolvente exterior são cumpridos por todas as soluções aqui analisadas. Convém, contudo lembrar que apesar do regulamento não definir nenhum mínimo regulamentar para envolventes exteriores horizontais (coberturas), esta deve cumprir os mínimos regulamentares para as paredes de fachada, uma vez que pode ser considerada como uma parede inclinada ou mesmo horizontal.

Apesar de apenas cinco das soluções analisadas conseguirem cumprir o índice de isolamento sonoro a sons aéreos, há que referir que destas soluções apenas seis têm revestimento superficial, solução 127, 128, 129, 130, 131 e 132. Se nas restantes soluções fosse acrescentado algum tipo de revestimento superficial, a probabilidade de cumprimento regulamentar seria elevada, uma vez que os valores de R_w estão bastante próximos dos mínimos regulamentares.

As soluções que cumprem os limites regulamentares do RRAE para envolvente interior são todas elas muito espessas e/ou com uma elevada densidade, tornando-as boas isolantes acústicas.

Passando agora para a coluna do coeficiente de transmissão térmica, U , do Quadro 4.7 é perceptível que nem todas as soluções cumprem os mínimos regulamentares como soluções de envolvente interior. Se se analisar as diferenças existentes entre as soluções que cumprem e as que não cumprem este requisito, facilmente se percebe que as que cumprem este requisito são todas aquelas que têm na sua constituição algum tipo de isolamento térmico/acústico e todas aquelas que não têm não cumprem o regulamento. Assim sendo é possível concluir que em fase de projecto, visto também ser útil para a melhoria das características acústicas, é conveniente a adopção de soluções construtivas que possuam algum tipo de isolamento pois este vai facilitar a passagem regulamentar em ambos os regulamentos.

Para a envolvente exterior foram excluídos da análise as soluções 128, 129, 130, 131 e 132 por não serem apropriadas à aplicação como envolvente exterior.

As restantes soluções analisadas que possuem algum tipo de isolamento térmico/acústico, as mesmas que cumprem o regulamento para envolvente interior, também cumprem o regulamento como envolvente exterior, excepto a solução 125 que não cumpre para a zona climática I3. Daqui pode-se concluir que, apesar destas soluções não estarem totalmente preparadas para servirem de envolvente exterior e necessitarem de mais algumas camadas de outros materiais, estas já apresentam um nível de isolamento térmico satisfatório pelo que a aplicação dessas outras camadas só irá melhorar esse isolamento e permitir, muito provavelmente o cumprimento dos valores mínimos de referência, que para as soluções aqui analisadas, não são cumpridos, excepto para a solução 126 na zona climática I1.

Pelo Quadro 4.8 é perceptível que as diferenças entre os valores característicos das soluções e os mínimos regulamentares são muito baixos, principalmente para o caso dos elementos de envolvente interior.

Nos elementos de envolvente interior a tendência de evolução da percentagem da diferença para os mínimos regulamentares é de diminuir com o aumento da ponderação acústica, o que indica que a diferença percentual entre os valores característicos e os mínimos regulamentares do RRAE são inferiores aos registados para os mínimos regulamentares do RCCTE.

Nos elementos da envolvente exterior esta tendência inverte-se uma vez que a tendência é de aumentar o valor percentual com o aumento da ponderação acústica, o que indica que a diferença percentual entre os valores característicos das soluções e os mínimos regulamentares do RRAE são superiores aos registados para os mínimos regulamentares do RCCTE. Convém também lembrar que este facto da diferença percentual é superior

para o RRAE porque nesta dissertação não se contabilizou qualquer tipo de abertura e por isso estes valores de isolamento acústico na envolvente exterior saem altamente beneficiados, pelo facto do valor mínimo regulamentar do RRAE ser bastante inferior.

Ainda no Quadro 4.8 é possível verificar que as melhores soluções, por ordem decrescente, são: 126, 125, 136, 139, 120.

Estas soluções são soluções muito espessas e densas (136 e 139), ou soluções com isolamento térmico/acústico, caixas-de-ar espessas e com placas de gesso cartonado (126, 125, 120).

No quadro seguinte serão apresentadas algumas soluções com as suas respectivas características térmicas e acústicas. Após a definição destas soluções irão ser adicionadas a estas soluções novos materiais e definidas as suas novas características.

Quadro 5.5 – Comparação da evolução das características térmicas e acústicas.

Nº	Material	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	$R_{w,exp}$ [dB(A)]	$L_{w,calc}$ [dB(A)]	$L_{w,exp}$ [dB(A)]	$U_{int. asc.}$ [W/m ² .°C]
121	-	52	53	79	75	2,33
122	lã rocha + PGC	55	55	79	73	0,79
123	lã rocha + PGC + lajeta + icb + espuma polietilento	56	56	77	54	0,74
124	-	53	55	75	78	3,57
125	lã rocha + PGC	57	57	74	76	0,90
126	lã rocha + PGC + lajeta + icb + espuma polietileno	57	57	73	58	0,48
127	-	40	38	110	83	1,82
128	lã rocha + PGC	45	63	106	56	0,38
137	-	52	52	79	-	3,85
138	5cm de betão armado	54	54	75	-	3,57
139	15cm de betão armado	56	65	68	-	3,13

Pela análise ao quadro anterior pode-se concluir que a colocação de lã de rocha e uma placa de gesso cartonado acompanhada de uma caixa-de-ar na zona inferior da solução irá aumentar o índice de isolamento sonoro a sons aéreos, R_w , mas não influencia o índice de isolamento a sons de percussão, L_w . Contudo se se acrescentar a esta solução uma lajeta, uma placa de aglomerado negro de cortiça, icb, e espuma de polietileno na parte superior da solução, esta não provocará melhoramentos substâncias ao nível do R_w mas terá ao nível do L_w . Este facto é ainda mais relevante se se verificar os valores fornecidos de $L_{w,exp}$,

supondo que os ensaios foram feitos segundo as mesmas condições, uma vez que a fonte é a mesma, a diferença do nível de isolamento obtido para sons de percussão é bastante relevante com e sem a lajeta, o icb, e a espuma de polietileno.

Para soluções muito rígidas, como é o caso do betão armado, o índice L_w tende a aumentar com a espessura da camada rígida, betão armado, ou seja quanto mais rígida for a solução menor será o seu isolamento a sons de percussão, com é confirmado nas soluções 137, 138 e 139.

A expressão utilizada para o cálculo de isolamento sonoro a sons de percussão, 2.75, atribui para as soluções 129, 130, 131 e 132 o mesmo valor de índice de isolamento a sons de percussão, L_w . Para permitir uma análise mais cuidadosa da influência que os revestimentos de piso têm no índice L_w elaborou-se o Quadro 5.6 onde se utilizaram os valores experimentais fornecidos e não os calculados através da expressão 2.75, uma vez que esta não atribui nenhuma diferenciação de isolamento, apesar deste existir.

Quadro 5.6 – Efeitos de alguns revestimentos de pavimento numa solução construtiva.

Nº	Revestimento	$L_{w,exp}$ [dB(A)]
129	tacos de madeira	56
130	mosaico cerâmico	58
131	piso flutuante	55
132	alcatifa	53

No quadro anterior é visível, mais uma vez e como seria expectável, que os revestimentos mais rígidos conferem um menor isolamento que os mais resilientes. Ou seja o revestimento mais rígido é o mosaico cerâmico e este tem o menor isolamento a sons de percussão, uma vez que tem o maior valor do índice de L_w . O revestimento mais resiliente é a alcatifa e também como seria expectável é a solução que apresenta um maior isolamento a sons de percussão.

Logo para conferir maior isolamento a sons de percussão é aconselhável a substituição de materiais rígidos por materiais mais flexíveis.

- **Revestimentos de Piso**

Os revestimentos de piso, como o próprio nome indica, servem apenas para revestir uma superfície, pavimento, dando-lhe o acabamento final e não tem como função aumentar as suas resistências físicas.

Como os revestimentos têm de ser sempre aplicados sobre um pavimento, neste caso, não tem sentido estar a avaliar estas soluções quanto ao cumprimento regulamentar, por isso estas não aparecem referidas no Quadro 4.7 nem no Quadro 4.8, aparecendo apenas nos anexos A.5.1 e A.5.2.

Apesar de estas não aparecerem nos quadros do cumprimento regulamentar, a correcta escolha do tipo de revestimento a aplicar pode ser a diferença entre a passagem ou não em ambos os regulamentos.

Analisando o anexo A.5.1 é perceptível que, uma vez que as densidades dos materiais analisados são muito semelhantes, o índice de isolamento a sons aéreos vai aumentar com a espessura desses materiais.

No anexo A.5.1 ainda existe uma coluna com os índices de redução sonora devido à existência de revestimento de piso, $\Delta L_{w,exp}$, fornecido pela “Fonte”.

Este índice de redução sonora indica o incremento de redução sonora que a adopção de cada solução poderá ter na solução do pavimento.

Desta coluna é possível perceber que quanto mais espessa for a camada resiliente do pavimento, maior será o seu incremento de isolamento, soluções 143, 144 e 145 e soluções 140 e 141.

Nas soluções 143, 144 e 145 a espessura da membrana de polietileno vai aumentando, ou seja a resiliência aumenta, o que conduz ao aumento do índice de redução sonora.

Nas soluções 140 e 141 a colocação de uma placa de aglomerado negro de cortiça, icb, também faz aumentar o índice de redução sonora. Como a placa de icb também é um material resiliente o valor de redução também era expectável.

Os revestimentos de piso, além da contribuição acústica, também contribuem termicamente.

No anexo A.5.2 é possível verificar a resistência térmica dos revestimentos.

Através da análise a esta coluna conclui-se que todas as soluções analisadas, com excepção da solução 147, não prejudicam a contribuição da inércia térmica do elemento, uma vez que os valores de correcção devida ao revestimento interior, r_i , são iguais a 1 porque a resistência térmica dos revestimentos superficiais são inferiores a $0,14 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$. Na solução 147 como o valor da resistência térmica do revestimento superficial é superior a $0,14 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$ ($0,16 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$), este vai fazer com que para inércia térmica apenas seja contabilizado 75% ou 50% da massa superficial obtida segundo os critérios existentes no RCCTE, dependendo do tipo de envolvente a que o elemento construtivo diz respeito.

- **Envidraçados**

Após se terem analisado as soluções de paredes, pavimentos e revestimentos de pavimentos vai-se agora analisar um dos elementos que fragiliza, quer a nível térmico como a nível acústico, as envolventes exteriores dos edifícios ou fracções autónomas.

Recorrendo à coluna do R_w do Quadro 4.7 é possível verificar que, embora não muitas, existem algumas soluções que cumprem os mínimos regulamentares do RRAE para a envolvente exterior, o que poderia levar a pensar que se não houver mais aberturas nessa parede e a restante envolvente cumprir o regulamento, o envidraçado não colocaria em causa a verificação do regulamento. Contudo e como se tentará explicar agora, isto poderá não acontecer.

Antes de se explicar melhor o porquê desta verificação regulamentar não ser assim tão linear, convém observar a diferença existente entre os valores de $R_{w,calc}$ e $R_{w,exp}$ e verificar, em cada caso, qual foi a fonte da informação.

A partir da observação destas colunas do anexo A.6 é perceptível que os valores de $R_{w,calc}$ apresentam pequenas diferenças para os valores de $R_{w,exp}$ fornecidos pela Saint-Gobain e que nas restantes soluções essas diferenças são maiores.

Este facto pode ser explicado pelos métodos de aferição do índice de isolamento sonoro, R_w , utilizados nas soluções. As informações fornecidas para as soluções da Saint-Gobain, por ser um fabricante, tiveram por base ensaios experimentais em laboratório e por isso estes valores aproximam-se mais dos obtidos pela expressão. As informações sobre os índices de isolamento acústico das restantes soluções não foram fornecidas por fabricantes mas sim por empresas ou pessoas que se deslocaram à obra, fizeram os ensaios e registaram os valores de isolamento conferido por cada solução, ou seja são informações obtidas através de ensaios em obra, longe das condições ideais de um laboratório. *In situ*, além das condições não serem as ideais, o nível de isolamento conferido pelo envidraçado também está dependente da qualidade do caixilho.

Se se observar agora, de entre as soluções que cumprem os mínimos regulamentares do RRAE para envolvente exterior, aquelas cuja fonte não é a Saint-Gobain e depois se se comparar os valores fornecidos pelas respectivas fontes e os calculados, percebe-se que em obra nenhum destes envidraçados, com o respectivo caixilho, conseguiu cumprir sozinho os limites regulamentares, com excepção das soluções 206 e 207. Logo, para que não se corram riscos de em obra o projectado não cumprir os requisitos regulamentares do RRAE, convém sempre supor que os envidraçados irão influenciar de forma negativa o isolamento global da envolvente exterior.

Sabendo que a Saint Gobain é um fabricante e que os valores dos seus índices de isolamento tendem sempre a ser melhores do que na realidade são e muito dificilmente

ocorreria o contrário, pode-se observar que das restantes soluções que cumpriam o RRAE para envolvente exterior, com os valores obtidos através da expressão, com os valores fornecidos pela Saint-Gobain, nenhuma consegue cumprir o regulamento.

Quanto ao cumprimento dos valores de referência, todas as soluções estudadas cumprem-nos para uma zona climática I1, contudo para as outras restantes zonas climáticas, I2 e I3, só os envidraçados duplos analisados nesta dissertação conseguiram cumprir este valor de referência.

Uma vez que foram analisadas muitas soluções envidraçadas pode-se dizer que para qualquer que seja a zona climática deverão ser adoptados vidros duplos, por estes se aproximarem mais dos valores de referência e assim facilitar o cumprimento do RCCTE do edifício ou fracção autónoma.

Recorrendo agora ao Quadro 4.8 consegue-se verificar que as soluções com melhor posição, por ordem decrescente, são: 207, 206, 203, 168, 201, 200, 171, 202, 167, 199.

Destas soluções que foram melhor classificadas, todas elas apresentam espessuras de vidro simples muito significativas ou então possuem dois panos envidraçados, com uma espessura razoável, separados por uma caixa-de-ar.

A solução melhor posicionada, 207, é a única que possui duas janelas, sendo que uma delas tem um vidro simples e a outra janela um vidro duplo.

Com o objectivo de se conseguir perceber a influência que tem o tipo de vidro e a espessura da caixa-de-ar no isolamento a sons aéreos para uma espessura global de envidraçado constante realizou-se o Quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Índice R_w de envidraçados com a mesma espessura global.

Nº	Constituição	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	$R_{w,exp}$ [dB(A)]	Fonte
153	6	33	29	Marco A. O.
163	6	33	31	Saint-Gobain
188	6	33	31	Marco A. O.
189	33.1A	34	36	Saint-Gobain
174	4+16+4	35	30	Saint-Gobain
175	6+12+6	37	33	Saint-Gobain
176	4+12+8	37	34	Saint-Gobain
181	4+16+4	35	30	Saint-Gobain
182	6+12+6	37	33	Saint-Gobain

Nº	Constituição	$R_{w,calc}$ [dB(A)]	$R_{w,exp}$ [dB(A)]	Fonte
186	4+12+8	37	34	Saint-Gobain
198	6+12+33.1A	37	37	Saint-Gobain

O quadro anterior permite perceber, através das soluções 153, 163, 188 e 189, que a expressão de cálculo utilizada nesta dissertação para o índice R_w , para os envidraçados, tende a aproximar-se mais dos valores obtidos em laboratório que os valores obtidos *in situ*.

A comparação entre as soluções 153 e 163 e as soluções 188 e 189, ambos os grupos de soluções compostos por envidraçados com a mesma espessura e do mesmo tipo, diferindo apenas no método de obtenção do índice R_w , permite perceber as diferenças existentes entre as medições *in situ*, apresentando os valores mais baixos, o valor obtido pela expressão de cálculo, apresentando valores próximos aos valores laboratoriais ou valores intermédios entre os laboratoriais e os *in situ*, e por fim os valores laboratoriais, apresentando-se sempre mais optimistas do que a medição *in situ*.

Nas restantes soluções ainda não analisadas é possível verificar que os seus índices $R_{w,calc}$ são todos muito semelhantes. Esta semelhança é explicada pelo facto de todas elas apresentarem a mesma espessura, serem feitas do mesmo material, variando apenas a espessura da caixa-de-ar.

Como o objectivo é tentar perceber o efeito que tem a variação do tipo de envidraçado, a espessura do envidraçado e a espessura da caixa-de-ar tem no isolamento sonoro do envidraçado a sons aéreos irá ser feito de seguida uma análise aos vários envidraçados com uma espessura global de 24 mm, tendo por base os valores da Saint-Gobain, visto que com a expressão de cálculo não se registam variações significativas.

Após analisar o Quadro 5.7 conclui-se que envidraçados do tipo Planilux e Planistar apresentam os mesmos índices de isolamento sonoro a sons aéreos, sendo a sua única diferença o valor do coeficiente de transmissão térmica, que é superior para os envidraçados Planilux logo têm um pior comportamento térmico segundo o RCCTE.

Através da comparação entre as soluções 182 e 198, ou entre as soluções 188 e 189, pode-se concluir que o facto de o vidro interior ser laminado na solução 198 e na 189 melhora o isolamento acústico em 4 dB(A) e 5 dB(A), respectivamente.

Pela comparação entre as soluções 181, 182 e 186 pode-se concluir que a caixa-de-ar existente entre os panos envidraçados confere menos isolamento acústico ao envidraçado que a própria espessura do envidraçado. Ou seja como é visível neste quadro, as soluções 182 e 186 tem no total uma espessura de panos envidraçados de 12mm e uma caixa-de-ar de 12mm conferindo-lhes um isolamento acústico de 33 dB(A) e 34 dB(A), respectivamente, e a solução 181 tem uma espessura de panos envidraçados de 8mm e uma caixa-de-ar de 16mm e um isolamento acústico de 30 dB(A), inferior em 3 dB(A), em relação à solução 182.

De registar ainda que as espessuras dos panos de envidraçado das soluções 182 e 186 pouco influenciaram o seu isolamento acústico, sendo quase negligenciável tendo em conta a percentagem de envidraçado comumente existente nas envolventes exteriores.

Resumidamente conclui-se que os envidraçados laminados têm um comportamento acústico superior aos normais, que a espessura dos panos envidraçados é mais benéfica no isolamento acústico que a espessura da caixa-de-ar, que o preenchimento da caixa-de-ar com árgon melhora o coeficiente de transmissão térmica assim como a existência da caixa-de-ar a separar os panos de envidraçado, que o envidraçado ser laminado ou normal não influencia o seu coeficiente de transmissão térmica e por fim convém referir que estes envidraçados são colocados dentro de caixilharias e se estas não se apresentarem ao nível do envidraçado escolhido pouca influência irá ter a adopção de um bom envidraçado.

Apesar do objectivo principal desta dissertação ser a análise de soluções construtivas, durante a pesquisa de expressões que permitissem obter o índice de isolamento sonoro a sons aéreos surgiram várias expressões adaptadas por vários autores.

Pela quantidade de expressões encontradas parece oportuno tentar comprovar a fiabilidade dos resultados obtidos das expressões adoptadas para o cálculo do índice $R_{w,calc}$. Para tentar comprovar esta fiabilidade realizaram-se os gráficos presentes nas figuras: Figura 4.1 e Figura 4.2.

O gráfico presente na Figura 4.1 apresenta a diferença entre o isolamento aéreo obtido pela expressão utilizada na dissertação e o valor de isolamento aéreo fornecido pelos fabricantes ou por medições *in situ*.

Pela análise desta figura verifica-se que a maioria das soluções apresenta uma diferença entre os -5 e os 5 dB, valor recomendado por alguns autores como incremento de isolamento devido às transmissões marginais. Esta diferença pode ser explicada pelo facto da expressão adoptada, à semelhança das outras encontradas, ser bastante simplista, desta tentar dar um valor aproximado de isolamento aéreo para todo o tipo de soluções, da expressão por ser demasiado simplista não ser muito criteriosa na consideração do isolamento dado por materiais absorventes acústicos e de baixa massa superficial, os designados materiais fonoabsorventes, e porque alguns dos valores de isolamento foram dados pelos próprios fabricantes, ou seja, obtidos em condições ideais, sem transmissões marginais e parasitárias, e outras obtidas *in situ*, com transmissões marginais e parasitárias muito variadas.

A partir da visualização da Figura 4.1 pode-se verificar que as maiores diferenças para o intervalo entre os 5 e os -5 dB são dadas por soluções com corkoco, lã mineral, regranulado de cortiça, fibra de coco, materiais específicos para isolamento acústico, ou seja, para soluções com materiais fonoabsorventes.

A Figura 4.2 apresenta o comparativo entre o valor dado pela expressão e o fornecido pelo fabricante ou obtido *in situ*.

Pela visualização deste gráfico e da linha de tendência é perceptível que esta expressão dá uma boa aproximação, na generalidade, ao isolamento aéreo das soluções, uma vez que a linha de tendência apresenta um declive de 1,0204, muito próximo da unidade (1), ou seja, pode-se concluir que o isolamento calculado e o obtido, em média, não diferem muito, comprovando a fiabilidade da expressão para a generalidade dos materiais. A expressão de calculo utilizada embora não seja muito rigorosa, pelas diferenças de isolamento dadas para algumas soluções, pode ser bastante útil para, numa fase inicial, dar a noção do índice de isolamento conferido pelas soluções e assim excluir, inicialmente e sem grandes cálculos, parte delas.

Por fim há que referir que todas as soluções acústicas são de concepção muito cuidadosa, contrariamente às térmicas que só têm de cumprir os mínimos regulamentares em projecto, porque, às vezes, o mais pequeno erro construtivo pode tornar uma solução com um isolamento óptimo em projecto e depois, *in situ*, onde necessita de cumprir os mínimos regulamentares do RRAE, apresentar-se como uma solução com um índice de isolamento acústico muito inferior ao projectado, podendo, em alguns casos, tornar a solução não regulamentar.

6. Síntese Global

Nesta dissertação foram estudados vários grupos de soluções quanto ao seu comportamento térmico e acústico, segundo os respectivos regulamentos.

No capítulo anterior foi efectuada uma análise detalhada dos resultados obtidos nesta dissertação. Neste capítulo irá ser descrito, resumidamente e para cada grupo de soluções, as principais conclusões retiradas do capítulo Análise de Resultados.

- **Paredes Simples**

Pela análise feita às soluções de paredes simples percebe-se que estas necessitam de ter uma elevada massa superficial e/ou ter algum tipo de isolamento térmico e acústico para que permitam o cumprimento de ambos os regulamentos, RCCTE e o RRAE.

Para a situação mais exigente a nível acústico, envolvente interior, a mais difícil de cumprir o regulamento, verifica-se que apenas quatro das soluções analisadas conseguem-no cumprir, demonstrando bem a complexidade deste regulamento. Além da exigência regulamentar demonstrada, através desta análise também se percebe a importância que, nas paredes simples, a espessura, a massa superficial do elemento e a existência ou não de isolamento térmico/acústico tem para o cumprimento do RRAE, ou seja apenas as soluções que cumpram pelo menos um destes requisitos têm hipótese de cumprir o regulamento acústico, RRAE.

Para o regulamento térmico conclui-se que soluções com baixa densidade apresentam valores de coeficiente de transmissão térmica suficientes para o cumprimento do RCCTE. Apenas as soluções excessivamente delgadas, um pano de tijolo 7 cm na solução 1, ou as soluções demasiado densas, betão armado, não cumprem os mínimos regulamentares. Logo para o cumprimento deste regulamento basta optar por soluções com espessuras superiores a 15 cm e que tenham na sua constituição elementos vazados que facilmente se cumpre este regulamento.

Para o cumprimento de ambos os regulamentos devem-se adoptar soluções com algum tipo de isolamento térmico/acústico, quer a solução adoptada seja muito ou pouco densa, e com espessuras elevadas, tanto maiores quanto menor for a densidade dos materiais utilizados.

De todos os materiais analisados nesta dissertação, aquele que apresentou o melhor equilíbrio entre o isolamento térmico e acústico foi o tijolo de furação vertical, apresentado um bom isolamento térmico e acústico.

- **Paredes Duplas**

Da análise efectuada às paredes duplas conclui-se que, à semelhança das paredes simples, a densidade das soluções, a existência de isolamento térmico/acústico e a espessura das soluções são as características mais importantes para a verificação de ambos os regulamentos.

Além das conclusões que já tinham sido referidas anteriormente, percebeu-se que a existência de uma caixa-de-ar além de melhorar as características térmicas, por baixar o coeficiente de transmissão térmica, também melhora o isolamento a sons aéreos, principalmente se existir no interior da caixa-de-ar algum tipo de isolamento fibroso, designado de fonoabsorvente.

Como todas as soluções cumpriram facilmente os mínimos regulamentares do RCCTE e considerando que as soluções com isolamento térmico/acústico no interior da sua caixa-de-ar cumpriram, além dos mínimos regulamentares, os mínimos de referência, conclui-se que todas as soluções de envolvente exterior deverão possuir caixa-de-ar e isolamento térmico/acústico de forma a permitir um fácil cumprimento regulamentar, em ambos os regulamentos, por estes melhorarem significativamente os níveis de isolamento térmico e acústico.

- **Paredes Leves**

Pela análise efectuada às paredes leves percebe-se que estas têm um óptimo comportamento térmico, todas as soluções analisadas cumprem os mínimos regulamentares do RCCTE, e têm igualmente um bom comportamento acústico, embora não seja o suficiente para cumprir os mínimos regulamentares para envolvente interior. Contudo, uma vez que esta solução não pode ser aplicada sozinha na envolvente, pode ter um papel fundamental no reforço do isolamento térmico e/ou acústico de uma solução mais pesada que necessita de algum ou de ambos os reforços.

Este tipo de solução desempenha assim um papel fundamental principalmente no reforço de isolamento acústico quando o valor de isolamento conferido pela solução adoptada em projecto não corresponde ao valor medido *in situ* e assim com o recurso a este tipo de solução como reforço consegue-se muitas vezes passar a cumprir os mínimos regulamentares sem grandes investimentos e num curto espaço de tempo, apesar de ter como consequência a perda de alguma área útil; por outro lado, pode ainda ter como vantagem o reforço de isolamento térmico.

Apesar de já ter sido estudado para as paredes duplas, procurou-se também na análise feita a este tipo de soluções perceber o que teria maior importância, se uma caixa-de-ar preenchida com isolamento térmico/acústico ou uma caixa-de-ar não preenchida, visto

serem soluções de baixa espessura. Pela análise feita, conclui-se que é preferível ter sempre uma caixa-de-ar preenchida com algum tipo de isolamento do que uma caixa-de-ar vazia com a espessura do isolamento comparado, ou mesmo superior.

Além da caixa-de-ar, também se quis perceber qual seria a influência que cada placa teria nos respectivos isolamentos, para perceber se valeria a pena o recurso a estas e em que casos. Pela análise efectuada percebeu-se que cada placa de gesso cartonado em cada pano permite, em média, um aumento de 3 dB(A) de isolamento, ou seja algo muito significativo. Quanto ao isolamento térmico conferido por este aumento percebeu-se que não era significativo. Logo, conclui-se que se objectivo for o reforço acústico, quanto mais placas de gesso cartonado tiver melhor será o isolamento acústico; se o objectivo for o reforço térmico, o aumento de placas não irá afectar de forma significativa o isolamento, sendo preferível a adopção de outro tipo de isolamento térmico, mais isolante.

- **Pavimentos**

Na análise feita às soluções de pavimentos não surgiu nenhum facto relevante; estas apresentaram as mesmas características que as paredes até aqui analisadas. Ou seja, quanto maior era a sua densidade, maior a sua espessura e quanto mais espesso era o isolamento térmico e acústico, maior era o seu índice de isolamento a sons aéreos.

Nos pavimentos, como nas soluções de paredes analisadas, é conveniente a adopção de isolamentos térmicos/acústicos, condição importante para a verificação regulamentar acústica e térmica.

Apesar das soluções analisadas não estarem devidamente preparadas para cumprir os requisitos mínimos construtivos de uma envolvente exterior, faltando algumas camadas para conferir uma adequada estanquicidade à solução, reparou-se que todas aquelas que tinham na sua composição algum tipo de isolamento térmico/acústico cumpriam os mínimos regulamentares do RCCTE, o que demonstra que uma solução com um adequado isolamento térmico/acústico não terá grandes dificuldades em cumprir o regulamento térmico, RCCTE.

Apesar de ter analisado até aqui sempre o isolamento sonoro a sons de aéreos, nos pavimentos também tem de se analisar o seu isolamento a sons de percussão.

Na análise feita a sons de percussão percebeu-se que a colocação de materiais resilientes ajuda a aumentar o nível de isolamento e este é tanto maior quanto maior for a sua espessura. Apesar de se ter concluído que estes materiais resilientes são bastante úteis na diminuição da propagação dos sons de percussão também se viu, através de um quadro comparativo, que estes não contribuem de uma forma significativa para o isolamento a sons aéreos.

Por fim, através de outro quadro comparativo, tentou-se comprovar que quanto maior a resiliência de um material, neste caso revestimento de superfície, maior é o isolamento a sons de percussão, uma vez que o mosaico cerâmico era o que conferia à solução principal menos isolamento e a alcatifa o maior isolamento.

- **Revestimentos de Piso**

Os revestimentos de piso, apesar de serem soluções delgadas, pelo menos as analisadas nesta dissertação, podem influenciar bastante o índice de isolamento térmico do pavimento. Pelo que se conclui que, por vezes, uma correcta escolha do tipo de revestimento a aplicar pode ser a diferença entre a passagem ou a reprovação regulamentar. Contudo também se deve ter cuidado não só com o coeficiente de transmissão térmica conferido pela solução como também pela resistência térmica que este confere, uma vez que, como acontece na solução 147, alguns revestimentos podem ter uma resistência térmica tão elevada que funcionam como um isolamento superficial, ou seja tornam inútil a massa superficial do elemento sobre o qual foram assentados para efeitos de inércia térmica.

Para a componente acústica, percebeu-se que quanto maior a resiliência dos materiais adoptados, maior será o isolamento conferido aos sons de percussão, e como as massas superficiais entre os elementos analisados não diferem muito, também se percebeu que a nível de sons aéreos, quanto mais espesso for o elemento, maior será o seu nível de isolamento acústico, na generalidade.

- **Envidraçados**

Da análise feita aos envidraçados a nível térmico percebeu-se que os de duplo pano apresentam características térmicas melhores que os de pano simples e que a substituição do preenchimento da caixa-de-ar de ar para argón melhora bastante este isolamento térmico. Além das características já referidas também foi perceptível que entre os vidros do tipo Planistar e Planilux, apesar de não diferirem no isolamento acústico, estes diferem na sua condutibilidade térmica. Este facto deve-se sobretudo ao facto de os vidros da Planistar serem compostos por uma capa fina e transparente de materiais metálicos que conferem ao vidro uma baixa emissividade. Logo, para facilitar o cumprimento do RCCTE deve-se optar sempre por vidros duplos e é aconselhável a adopção de vidros do tipo do Planistar por melhorar a condutibilidade térmica do envidraçado.

Como nesta análise foram considerados na sua maioria, envidraçados da Saint-Gobain, optou-se por utilizar os valores fornecidos pelo fabricante para comparar as características entre os envidraçados, visto que a fonte é a mesma e logo os métodos de ensaio também o deverão ser.

Desta análise percebe-se que os vidros laminados são superiores a nível de isolamento acústico aos vidros normais, que a caixa-de-ar contribui menos para o isolamento acústico de um envidraçado que a espessura de vidro que este contém.

Além das conclusões das características dos envidraçados também se concluiu, pelas diferenças existentes entre os dados do fabricante e os medidos *in situ*, que as condições de medição influenciam bastante os resultados, uma vez que em laboratório estas são ideais e *in situ* não, e que a qualidade do caixilho irá também influenciar o nível de isolamento acústico. Ou seja, não faz sentido ter um vidro com um elevado isolamento acústico se depois o som irá conseguir atravessar à mesma o envidraçado através do caixilho, por este apresentar demasiadas aberturas e ser de má qualidade.

Por fim foi feita uma pequena análise à expressão utilizada para aferir o nível de isolamento acústico, $R_{w,calc}$, da qual se concluiu que a expressão utilizada, apesar de apresentar grandes variações para alguns dos valores de isolamento a sons aéreos fornecidos, confere para o global das soluções analisadas uma fiabilidade aceitável, uma vez que a maioria das soluções se encontravam dentro de um intervalo entre os 5 e os -5 dB(A) de diferença entre o valor calculado e o fornecido, valor este que muitos autores defendem como sendo a diminuição de isolamento que as transmissões marginais provocam nas soluções.

7. Conclusões Gerais

Segundo um estudo feito pela organização mundial de saúde em 2000, concluiu-se que mais de metade dos europeus estão expostos a níveis sonoros excessivos e que mais de 30% da população europeia está exposta a mais de 55 dB(A) durante a noite, o que lhes transtorna o sono.

Em Portugal, segundo o Relatório do Estado do Ambiente, 16% da população Portuguesa encontra-se exposta a níveis de ruído superiores a 65 dB(A), que é considerado incomodativo.

Como se pode verificar pelos relatórios o isolamento acústico nas habitações tem um papel fundamental na saúde e bem-estar das populações.

Devido aos factos registados nestes relatórios e ao aparecimento de novos regulamentos acústicos e térmicos, procurou-se através desta dissertação avaliar soluções construtivas quanto ao seu isolamento acústico e também quanto ao seu isolamento térmico.

O objectivo de avaliar várias soluções quanto ao comportamento térmico e acústico foi cumprido com sucesso uma vez que se avaliou ao longo desta dissertação 207 soluções construtivas, divididas em seis grupos, quanto ao seu isolamento acústico e isolamento térmico.

Após se obterem os respectivos isolamentos acústicos e térmicos das soluções analisadas, estas foram avaliadas quanto ao cumprimento regulamentar segundo o RCCTE, para a parte térmica, e segundo o RRAE, para a parte acústica.

No final desta avaliação foi possível verificar a facilidade com que cada solução cumpria o regulamento, sendo evidente após as análises feitas que o RRAE é um regulamento muito mais exigente, não só por requerer medições *in situ* para o cumprimento regulamentar como também porque os seus mínimos regulamentares são cumpridos com menor facilidade que os mínimos regulamentares do RCCTE.

Apesar do RCCTE e o RRAE serem regulamentos distintos e que obrigam a verificações também distintas, estes exigem na generalidade o mesmo das soluções, ou seja, exigem soluções com alguma espessura, com algum tipo de isolamento térmico/acústico e com caixa-de-ar. O que comprova que ambos os regulamentos não são nada incompatíveis e que na maioria dos casos até são bastante compatíveis, uma vez que, normalmente, uma melhoria de isolamento acústico confere uma melhoria de isolamento térmico e vice-versa.

Ainda que esta dissertação tivesse por base um análise aprofundada quanto às características térmicas e acústicas foi também necessário tentar comprovar a fiabilidade da expressão de cálculo utilizada no isolamento acústico a sons aéreos, $R_{w,calc}$. Esta comprovação foi necessária devido às excessivas expressões adaptadas por vários autores

para o cálculo do índice $R_{w,calc}$ encontradas no decorrer da pesquisa feita durante esta dissertação. Após se terem elaborado alguns gráficos comparativos entre os índices de isolamento calculados e os fornecidos chegou-se à conclusão que esta expressão atribui valores médios de isolamento válidos, contudo não são muito rigorosos. O rigor inexistente na expressão de cálculo também pode ser explicável devido ao facto do valor de isolamento atribuído pelas várias soluções construtivas estar muito dependente: da qualidade construtiva das soluções propostas em projecto; da área do elemento de separação entre os espaços; da distribuição e características dos elementos e componentes que constituem a parede; das transmissões marginais e das transmissões parasitas. Logo cada caso é um caso e nem sempre a melhor solução para um caso é necessariamente a melhor solução para todos os casos, ou seja este método de previsão acústico é mais exigente que o térmico, e, além disso, pequenos erros construtivos podem comprometer a melhor das soluções acústicas projectados.

Com também já foi referido, para questões regulamentares do RRAE apenas interessam os valores medidos *in situ*, daí a dificuldade encontrada em cumprir o regulamento, por isso o não cumprimento regulamentar obrigará o construtor a gastos adicionais elevados para melhorar o isolamento acústico das soluções actualmente existentes. Contudo, estes gastos poderiam ser minimizados com a adopção de soluções um pouco mais dispendiosas que as iniciais mas mais isolantes e por isso com maior margem para erros construtivos. Logo ou se tem uma equipa bastante especializada e com bons conhecimentos nos métodos construtivos das soluções adoptadas, algo que ainda não é muito fácil de encontrar, ou então o melhor será recorrer a métodos construtivos mais simples e mais caros de forma a minimizar a existência de erros construtivos e futuras intervenções de melhoria de isolamento acústico.

Como conclusão geral da análise elaborada entre as soluções analisadas e os regulamentos, RCCTE e RRAE, percebe-se que estes regulamentos têm um objectivo muito claro: o de melhorar o conforto interior das habitações.

Embora o objectivo principal seja a melhoria do conforto no interior nas habitações estes têm como consequências o controlo do nível construtivo das habitações e o aumento da investigação sobre materiais com melhores propriedades acústicas e térmicas, o que beneficia bastante os futuros proprietários das habitações.

Por fim, pode-se dizer que esta dissertação foi bastante útil porque permitiu perceber o comportamento térmico e acústico de algumas soluções construtivas e também porque permitiu dar a conhecer as dificuldades existentes na vertente acústica, principalmente na definição de uma expressão de cálculo mais rigorosa que permita o seu uso sem que seja necessário adaptações.

8. Sugestões de Trabalhos Futuros

Durante esta dissertação verificou-se que seria interessante realizar algumas investigações com o objectivo de se perceber melhor alguns aspectos.

Uma das principais questões que se levantou logo no início da dissertação foi: de todas as expressões de previsão de isolamento acústico encontradas, qual destas seria aquela que melhores resultados, mais próximos da realidade *in situ*, de valores de isolamento acústico dá?

Da pequena análise que se fez concluiu-se que a melhor, das que se pesquisou, seria a do Modelo Misto Revisto. Contudo esta análise carece de maior profundidade, pelo que seria interessante considerar algumas das expressões mais frequentemente utilizadas no cálculo do isolamento sonoro a sons aéreos e ver aquela que mais se aproxima da realidade existente.

Embora exista actualmente uma norma que já define um método de cálculo do isolamento acústico a sons aéreos, este encontra-se bastante desactualizado e não apresenta valores correspondentes à realidade, pelo que a investigação feita para as expressões comumente utilizadas pode permitir uma futura actualização desta norma.

Além de se analisar as várias expressões também seria interessante e facilitaria muito a elaboração dos projectos se se conseguisse reunir o máximo de informação possível e elaborar-se uma base de dados de vários tipos de soluções com os respectivos índices de isolamento acústico e térmico, ou se possível, haver alguma entidade, além do LNEC, que fizesse ensaios experimentais e elaborasse essa base de dados.

Outra das dificuldades existentes, actualmente, encontra-se nos envidraçados. Não existe, ou pelo menos não foi encontrado durante todo o processo de investigação, muitas fontes que forneçam o isolamento conferido pelo caixilho dos envidraçados.

Contudo, este tem grandes implicações térmicas, acústicas e até mesmo de ventilação natural, pelo que se recomenda que futuramente também se tente analisar o máximo de tipologias de caixilhos com os variados tipos de envidraçado e posteriormente tornar-se pública essa informação, uma vez que cada vez se encontram mais e maiores vãos envidraçados nas envolventes exteriores das habitações. Com esta investigação seria facilitada a escolha em projecto do tipo de envidraçado a adoptar, quer na vertente térmica quer na vertente acústica.

Hoje em dia, devido aos novos regulamentos, RCCTE e RRAE, os fabricantes de materiais de construção têm procurado inovar tecnologicamente as suas soluções para conseguirem responder às novas exigências do mercado. A estes materiais, por serem o futuro da

construção, também deveria ser feita uma análise comparativa das características entre estes e os que actualmente exercem as suas funções.

Como foi também visto ao longo desta dissertação, o isolamento acústico é muito influenciável pela qualidade construtiva pelo que seria relevante e permitiria a diminuição desses erros construtivos se fosse elaborada uma investigação sobre os erros mais comuns na construção, assim como o seu efeito na quebra de isolamento quando estes ocorrem.

A nível regulamentar seria interessante adoptar o mesmo método do RCCTE no RRAE, ou seja, definir uma escala, como as classes energéticas no RCCTE, que permitisse aos futuros moradores das habitações saberem, além da classe energética da habitação, a “classe acústica” da habitação e assim ser-lhes dada a hipótese de optar entre habitações semelhantes mas com classes diferentes, algo que actualmente não é possível uma vez que as habitações só têm de cumprir os mínimos regulamentares não sendo obrigatório mostrar ao futuro proprietário o seu nível de isolamento, além de que actualmente muitos municípios ainda não exigem a totalidade ou parte dos ensaios acústicos obrigatórios.

Por fim seria igualmente interessante fazer uma análise comparativa de características térmicas e acústicas de materiais com as mesmas características físicas e composição mas fabricados em locais diferentes e com esta análise tentar perceber se, além das características físicas dos materiais, a própria origem de fabrico condiciona as características térmicas e acústicas.

9. Bibliografia

9.1. Bibliografia Geral

- [1] Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e Acustico - Manualetto di Acustica Edilizia, Itália, 2006;
- [2] Bragança, L.; Correia da Silva, F. – Comparação entre modelos de Previsão de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea de Elementos Construtivos, DEC-UM; Minho, Portugal, 2000;
- [3] Ferreira, A. R. P. C. – Soluções Técnicas para Isolamento Sonoro de Edifícios de Habitação, Tese de Mestrado, DEC-IST, Lisboa, Portugal, 2007;
- [4] Fonseca, A. R.; Lopes, A. M. – Índices de Isolamento Sonoro em Edifícios Habitacionais e Mistos. Resultados de Ensaios *in situ* do LabAV da ECO 14 e Comparação de Cenários entre o DL 129/2002 e o DL 96/2008 , Coimbra, Portugal, 2008;
- [5] Freitas, V. P. – Implicações Construtivas do Novo RCCTE na Concepção de Paredes de Alvenaria, Seminário sobre Paredes de Alvenaria, 2007;
- [6] Gomes, Álvaro – Certificação Energética de Edifícios, Acetatos MEEC – Gestão da Energia em Edifícios e na Indústria, Portugal, 2004/2005;
- [7] Martins da Silva – A Componente Acústica na Reabilitação de Edifícios de Habitação, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2001;
- [8] Martins da Silva, P. – Projecto de Condicionamento Acústico de Edifícios, NS 106, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2006;
- [9] Mateus, Diogo – Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído, Sebenta, Portugal, 2008;
- [10] Mateus, Diogo – Isolamento Acústico de Elementos de Compartimentação Leves em Edifícios, Tese de Doutoramento, FCTUC, Coimbra, Portugal 2004;
- [11] Mateus, Diogo – Sebenta do Curso de Formação em Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído, FB Formação, Lisboa, Portugal, 2009;
- [12] Mateus, Diogo; António, Julieta; Tadeu, António – Isolamento Acústico Conferido por Divisórias Leves em Gesso Cartonado. Resultados Experimentais Versus Teóricos, Publicação FCTUC, Coimbra, Portugal, 2004;
- [13] Mateus, Diogo; Tadeu, António – Comportamento Acústico, APICER, CTCV, FCTUC, Coimbra, Portugal, 2009;

- [14] Medeiros, Luana Bernardines – Ruído: Efeito extra-auditivo no corpo humano, CEFAC,1999;
- [15] Mendonça, Paulo – Habitar sob uma segunda pele – Estratégias para a redução do Impacto Ambiental de Construções Solar Passivas em Climas Temperados, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, UM, Minho, Portugal, 2005;
- [16] Oliveira de Carvalho, A. P.; Rodrigues, R. C.; Ferreira, T. – Sebenta do Curso de introdução aos Projectos de Condicionamento Acústico de Edifícios, IEP / IC, 2003;
- [17] Patrício, J.; Fontes de Melo, A. – Isolamento Sonoro de Lajes Fungiformes Aligeiradas com moldes Perdidos: Soluções Construtivas, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal;
- [18] Patrício, Jorge – Acústica nos Edifícios, Verlag Dashöfer, Lisboa, Portugal, 2008;
- [19] Rato, Vasco M. – Sebenta de Edificações, DEC-FCT-UNL, Almada, Portugal, 2007/2008
- [20] Rodrigues, A. Moret; Neves e Sousa, Albano – Sebenta do Curso de Formação em Comportamento Térmico e Acústico de Edifícios, DEC-IST, Lisboa, Portugal, 2008;
- [21] Santos Neto, N. A. dos – Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, dissertação mestrado, Santa Maria, RS, Brasil, 2006;
- [22] Santos, C. A. Pina dos; MATIAS, Luís – Coeficientes de Transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios, ITE 50, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2006;
- [23] Santos, C. A. Pina dos; PAIVA, J. A. Vasconcelos – Caracterização Térmica de Paredes de Alvenaria, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1990;
- [24] Santos, C. A. Pina dos; PAIVA, J. A. Vasconcelos – Caracterização Térmica de Pavimentos Pré-Fabricados, ITE 11, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1990;
- [25] Santos, C. Pina – Evolução das Soluções de Paredes Face a Novas Exigências Regulamentares, Seminário sobre Paredes de Alvenaria, 2007;
- [26] Sequeira Gonçalves, P. J.; Fernandes, N. O.; Fernandes, A. M. - Previsão do Nível de Ruído Ambiental na Zona de Intervenção do Programa Polis em Castelo Branco, Departamento de Engenharia Industrial, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, 2004;
- [27] Serra e Sousa, A.; Silva, R.; Abrantes V.; Freitas, V.; Sousa, H.; et al. – Manual de Alvenaria de Tijolo, APICER, CTCV, FCTUC, Coimbra, Portugal, 2000;

9.2. Normas

- [N.1] EN ISO 12354-1 (2000): Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.2] EN ISO 12354-2 (2000): Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.3] EN ISO 12354-3 (2000): Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 3: Impact sound insulation against outdoor sound, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.4] EN ISO 140-3 (1995): Acoustics: Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.5] EN ISO 140-4 (1998): Acoustics: Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation of building elements, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.6] EN ISO 140-5 (1998): Acoustics: Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.7] EN ISO 140-6 (1998): Acoustics: Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.8] EN ISO 140-7 (1998): Acoustics: Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.9] EN ISO 140-8 (1998): Acoustics: Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 8: Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavyweight standard floor impact sound insulation of floors, Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica;
- [N.10] RRAE: Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de Maio;
- [N.11] RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de Fevereiro;

9.3. Internet, Publicações

- [W.1] Vários – Revista DECO – Proteste, Portugal, 2005;
- [W.2] Vários – Revista DECO – Proteste, Portugal, 2009;
- [W.3] Vários – Revista Domingo Correio da Manhã, Portugal, 2007;
- [W.4] www.amde.pt
- [W.5] www.br.geocities.com
- [W.6] www.cesva.com
- [W.7] www.ctcv.pt
- [W.8] www.danosa.com
- [W.9] www.eca.usp.br
- [W.10] www.fibrosom.com
- [W.11] www.imperialum.com
- [W.12] www.isocor.pt
- [W.13] www.isover.com
- [W.14] www.knauf.es
- [W.15] www.loja.violadeouro.com.br
- [W.16] www.musicaeadoracao.com.br
- [W.17] www.polirigido.com
- [W.18] www.saintgobain.com
- [W.19] www.sotecnisol.pt
- [W.20] www.telecom.inescn.pt
- [W.21] www.texsa.com
- [W.22] www.veka.es
- [W.23] www.wikipedia.com

ANEXOS

A.1 – Paredes Simples

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica			
			Massa Superficial [kg/m²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U [W/m².°C]	Massa Total [kg/m²]	Tipo de parede	Massa Superficial [kg/m²]
1	reb. (20) – alv. (70) – reb. (20)	110	135,3	46	-	-	2,08	135,3	interior	135,3
2	reb. (20) – alv. (110) – reb. (20)	150	168,3	47	41	Diogo Mateus	1,78	168,3	interior	168,3
3	reb. (20) – alv. (150) – reb. (20)	190	194,5	48	44	Diogo Mateus	1,47	194,5	interior	194,5
4	reb. (20) – alv. (200) – reb. (20)	240	217,6	48	-	-	1,23	217,6	interior	217,6
5	reb. (20) – alv. (220) – reb. (20)	260	242,6	49	48	Diogo Mateus	1,23	242,6	interior	242,6
6	reb. (25) - bloco argila expandida (170) – reb. (25)	220	226,0	49	-	Artebel - Isoargila	0,72*	226,0	exterior	226,0
7	reb. (25) - bloco argila expandida (200) – reb. (25)	250	263,0	50	51	Artebel - Isoargila	0,74*	263,0	exterior	263,0
8	reb. (25) - bloco argila expandida (315) – reb. (15)	355	313,5	51	53	Artebel - Termoacustico	0,45*	313,5	exterior	300,0
9	reb. (20) - bloco argila expandida (110) – reb. (20)	150	153,0	47	-	Artebel	2,20*	153,0	exterior	153,0
10	reb. (20) - bloco argila expandida (150) – reb. (20)	190	156,0	47	-	Artebel	2,00*	156,0	exterior	156,0
11	reb. (20) - bloco argila expandida (200) – reb. (20)	240	184,0	48	-	Artebel	1,60*	184,0	exterior	184,0
12	reb. (25) - bloco argila expandida (250) – reb. (25)	300	440,0	53	53	Maxit- Isolsónico	1,10*	440,0	exterior	300,0
13	alv. de pedra (400)	400	1040,0	58	58	Diogo Mateus	2,90	1040,0	exterior	300,0
14	reb. (20) – alv. furação vertical (140) – reb. (20)	180	202,9	48	47	Preceram/Diogo	0,93	202,9	interior	202,9
15	reb. (20) – alv. furação vertical (190) – reb. (20)	230	244,3	49	-	-	0,84	244,3	interior	244,3
16	reb. (20) – alv. furação vertical (240) – reb. (20)	280	278,4	50	-	-	0,73	278,4	interior	278,4
17	reb. (20) – alv. furação vertical (290) – reb. (20)	330	321,4	51	-	-	0,59	321,4	interior	300,0
18	reb. (20) – alv. (110) - reboco (20) - icp (30) - PGC (13)	193	182,0	48	50	Amorim	0,78	178,1	interior	178,1
19	reb. (20) – alv. (110) - corkoco (40) - PGC (13)	183	146,1	46	55	Amorim	0,67	142,1	interior	142,1
20	reb. (15) – xps (60) - alvenaria (220) - reb (20)	315	268,0	50	53	Paulo Mendonça UM	0,41	266,5	interior	266,5
21	reb. (6) - icb (12) - alv (220) - PGC (12)	250	192,1	48	50 (-1;-5)	ISOCOR	0,99	180,2	exterior	150,0
22	betão armado (150)	150	375,0	52	-	-	3,13	375,0	interior	300,0
23	betão armado (200)	200	500,0	54	-	-	2,94	500,0	interior	300,0
24	betão armado (250)	250	625,0	55	-	-	2,78	625,0	interior	300,0
25	reb. (20) - betão armado (150) – reb. (20)	190	447,0	53	-	-	2,85	447,0	interior	300,0
26	reb. (20) - betão armado (200) – reb. (20)	240	572,0	54	-	-	2,70	572,0	interior	300,0
27	reb. (20) - betão armado (250) – reb. (20)	290	697,0	56	-	-	2,56	697,0	interior	300,0

28	reb. (20) - betão armado (150) - lâ rocha (40) - PGC (13)	223	423,0	53	-	-	0,72	421,4	interior	300,0
29	reb. (20) - betão armado (200) - lâ rocha (40) - PGC (13)	273	548,0	54	-	-	0,71	546,4	interior	300,0
30	reb. (20) - betão armado (250) - lâ rocha (40) - PGC (13)	323	673,0	55	-	-	0,70	671,4	interior	300,0
31	reb. (20) - EPS (40) - betão armado (150) – reb. (20)	230	447,6	53	-	-	0,70	447,0	interior	300,0
32	reb. (20) - EPS (40) - betão armado (200) – reb. (20)	280	572,6	54	-	-	0,69	572,0	interior	300,0
33	reb. (20) - EPS (40) - betão armado (250) – reb. (20)	330	697,6	56	-	-	0,68	697,0	interior	300,0
34	reb. (10) - alv. (150) - impersom (50) - caixa de ar (60) - PGC (13)	283	152,9	51	53	imperialum	0,49	10,4	exterior	10,4
35	reb. (10) - alv. (150) - impersom (40) - caixa de ar (70) - PGC (13)	283	152,5	50	53	Imperialum	0,56	10,4	exterior	10,4

Abreviaturas:

- alv – alvenaria;
- reb – reboco;
- icb – aglomerado negro de cortiça;
- PGC – placa de gesso cartonado
- EPS – poliestireno expandido moldado;

* Valor de U fornecido pelo próprio fabricante;

A.2 – Paredes Duplas

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica			
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U [W/m ² .°C]	Massa Total [kg/m ²]	Tipo de parede	Massa Superficial [kg/m ²]
36	reb. (15) – alv. (110) – reb. (15) – Danofon*** (28) – alv. (110) – reb. (15)	293	281,9	50	≥50	Danosa	0,62	273,6	interior	273,6
37	reb. (15) – alv. (70) – reb. (15) - lâ de vidro (30) – alv. (70) – reb. (15)	215	208,3	48	-	-	0,70	207,6	interior	207,6
38	reb. (15) – alv. (110) - reb (15) - lâ de vidro (30) – alv. (110) – reb. (15)	295	274,3	50	-	-	0,63	273,6	interior	273,6
39	reb. (15) – alv. (150) - lâ mineral (40) – alv. (150) – reb. (15)	370	301,8	50	56	Diogo	0,48	299,0	interior	299,0
40	reb. (15) – alv. (150) - cr2c**** (18) - lâ mineral (40) – alv. (110) – reb. (15)	348	278,4	50	53	Silêncio	0,69	272,8	interior	272,8
41	reb. (10) – alv. (70) – tecsound 2ft***** (22) – alv. (70) – reb. (10)	182	167,3	47	50	texsa	0,80	162,6	interior	162,6
42	reb. (20) - alv. (70) - caixa de ar (30) - alv. (70) – reb. (20)	210	198,6	52	-	-	1,31	198,6	exterior	150,0
43	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - alv. (70) – reb. (20)	250	231,6	52	-	-	1,19	231,6	exterior	150,0
44	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - alv. (110) – reb. (20)	290	264,6	53	-	-	1,09	264,6	exterior	150,0
45	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - alv. (110) – reb. (20)	330	290,8	57	-	-	0,96	290,8	exterior	150,0
46	reb. (20) - alv. (110) - reb. (15) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (110) - reb. (20)	345	294,4	56	54	Diogo Mateus	0,52	132,3	exterior	132,3
47	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (110) - reb. (20)	330	267,4	57	51	Diogo Mateus	0,52	132,3	exterior	132,3
48	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (110) - reb. (20)	370	293,6	57	53	Diogo Mateus	0,49	132,3	exterior	132,3
49	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - lâ rocha (40) - alv. (150) - reb. (20)	410	319,8	58	56	Diogo Mateus	0,46	158,5	exterior	150,0
50	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - xps (40) - alv. (110) - reb. (20)	330	265,6	55	-	-	0,50	132,3	exterior	132,3
51	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - xps (40) - alv. (110) - reb. (20)	370	291,8	55	-	-	0,47	132,3	exterior	132,3
52	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (50) - xps (40) - alv. (110) - reb. (20)	390	313,0	56	51	Paulo Mendonça UM	0,47*	132,3	exterior	132,3
53	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - xps (40) - alv. (150) - reb. (20)	410	318,0	56	-	-	0,46	132,3	exterior	132,3
54	reb. (20) - alv. (110) - caixa de ar (30) - icb (40) - alv. (110) - reb. (20)	330	269,0	57	-	-	0,55	132,3	exterior	132,3
55	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (10) - icb (40) - alv. (110) - reb. (20)	370	295,2	57	53	Amorim	0,53	132,3	exterior	132,3
56	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (10) - corkoco (40) - alv. (110) - reb.	370	294,8	57	53	Amorim	0,53	132,3	exterior	132,3

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica			
			Massa Superficial [kg/m²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U [W/m².°C]	Massa Total [kg/m²]	Tipo de parede	Massa Superficial [kg/m²]
	(20)									
57	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (30) - icb (40) - alv. (150) - reb. (20)	410	321,4	58	-	-	0,50	158,5	exterior	150,0
58	reb. (15) - alv. (110) - reb. (10) - caixa de ar c/ regranulado negro de cortiça(60) - alv. (110) - reb. (15)	320	268,6	58	52 (-1,-5)	Isocor	0,52	123,3	exterior	123,3
59	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar c/ regranulado negro de cortiça(50) - alv. (110) - reb. (20)	350	258,2	57	51	Amorim	0,54	132,3	exterior	132,3
60	reb. (20) - alv. (110) - reb. (15) - caixa de ar (30) - lâ de vidro (30) - alv. (110) - reb. (20)	335	292,3	57	-	-	0,59	132,3	exterior	132,3
61	reb. (20) - alv. (150) - reb. (15) - caixa de ar (30) - lâ de vidro (30) - alv. (110) - reb. (20)	375	318,5	58	-	-	0,55	132,3	exterior	132,3
62	reb. (10) - alv. (150) - caixa de ar (35) – impersom** (40) - caixa de ar (35) - alv. (150) - reb. (10)	430	283,8	57	52	Imperialum (70kg/m3)	0,43	140,5	exterior	140,5
63	reb. (10) - alv. (150) - caixa de ar (35) – impersom** (40) - caixa de ar (35) - alv. (150) - reb. (10)	430	282,6	57	-	-	0,43	140,5	exterior	140,5
64	reb. (20) - alv. (150) - caixa de ar (50) - xps (50) - alv. (110) - reb. (15)	395	283,1	55	53	Câmara municipal de Serpa	0,42	123,3	exterior	123,3
65	reb. (15) - alv. (110) - reb. (10) -caixa de ar (60) - icb (40) - alv. (110) - reb. (15)	360	268,2	57	53 (-1;-5)	Isocor	0,55	123,3	exterior	123,3

Abreviaturas:

- alv – alvenaria;
- reb – reboco;
- icb – aglomerado negro de cortiça;
- XPS – poliestireno expandido extrudido;
- EPS – poliestireno expandido moldado;

* Valor de U fornecido pelo próprio fabricante;

** Impersom - placa rígida de fibras de lâ de rocha aglutinadas com resina termo-endurecida;

*** DANOFON - composto multi-camada formado por uma lâmina de base betuminosa de alta densidade e uma manta de cada lado composta por fibras de algodão e têxtil reciclado, ligadas com resina fenólica ignifugada;

****cr2c - lâmina elastomérica de alta densidade e uma manta geotêxtil misturada com fibra de vidro;

*****TECSOUND® 2FT - painel insonorizante formado por dois feltros porosos entre os quais se intercala a lâmina sintética Tecsound com base polimérica de alta densidade, sem asfalto;

A.3 – Paredes Leves

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica			
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U [W/m ² .°C]	Massa Total [kg/m ²]	Tipo de parede	Massa Superficial [kg/m ²]
66	PGC (12,5) - lã mineral (48) - PGC (12,5)	73	21,9	42	42	knauf	0,64	20,00	interior	20,0
67	PGC (15) - lã mineral (48) - PGC (15)	78	25,9	43	44	knauf	0,63	24,00	interior	24,0
68	PGC (18) - lã mineral (48) - PGC (18)	84	30,7	44	44	knauf	0,62	28,80	interior	28,8
69	PGC (12,5) - lã mineral (70) - PGC (12,5)	95	22,8	44	42	knauf	0,47	20,00	interior	20,0
70	PGC (15) - lã mineral (70) - PGC (15)	100	26,8	45	44	knauf	0,47	24,00	interior	24,0
71	PGC (12,5) - lã mineral (90) - PGC (12,5)	115	23,6	44	42	knauf	0,38	20,00	interior	20,0
72	PGC (15) - lã mineral (90) - PGC (15)	120	27,6	45	46	knauf	0,38	24,00	interior	24,0
73	PGC (12,5) - caixa de ar (48) - PGC (12,5)	73	20,0	40	33	knauf	1,85	20,00	interior	20,0
74	PGC (15) - caixa de ar (48) - PGC (15)	78	24,0	41	37	knauf	1,79	24,00	interior	24,0
75	PGC (18) - caixa de ar (48) - PGC (18)	84	28,8	42	38	knauf	1,71	28,80	interior	28,8
76	PGC (12,5) - caixa de ar (70) - PGC (12,5)	95	20,0	40	36	knauf	1,85	20,00	interior	20,0
77	PGC (15) - caixa de ar (70) - PGC (15)	100	24,0	41	39	knauf	1,79	24,00	interior	24,0
78	PGC (12,5) - caixa de ar (90) - PGC (12,5)	115	20,0	40	36	knauf	1,85	20,00	interior	20,0
79	PGC (15) - caixa de ar (90) - PGC (15)	120	24,0	41	41	knauf	1,79	24,00	interior	24,0
80	2xPGC (12,5) - lã mineral (48) - 2xPGC (12,5)	98	41,9	46	48	knauf	0,60	40,00	interior	40,0
81	2xPGC (15) - lã mineral (48) - 2xPGC (15)	108	49,9	47	47	knauf	0,59	48,00	interior	48,0
82	2xPGC (12,5) - lã mineral (70) - 2xPGC (12,5)	120	42,8	47	52	knauf	0,45	40,00	interior	40,0
83	2xPGC (15) - lã mineral (70) - 2xPGC (15)	130	50,8	48	50	knauf	0,44	48,00	interior	48,0
84	2xPGC (12,5) - lã mineral (90) - 2xPGC (12,5)	140	43,6	48	51	knauf	0,37	40,00	interior	40,0
85	2xPGC (15) - lã mineral (90) - 2xPGC (15)	150	51,6	49	50	knauf	0,36	48,00	interior	48,0
86	2xPGC (12,5) - caixa de ar (48) - 2xPGC (12,5)	98	40,0	44	44	knauf	1,56	40,00	interior	40,0
87	2xPGC (15) - caixa de ar (48) - 2xPGC (15)	108	48,0	45	43	knauf	1,47	48,00	interior	48,0
88	2xPGC (12,5) - caixa de ar (70) - 2xPGC (12,5)	120	40,0	44	48	knauf	1,56	40,00	interior	40,0
89	2xPGC (15) - caixa de ar (70) - 2xPGC (15)	130	48,0	45	47	knauf	1,47	48,00	interior	48,0
90	2xPGC (12,5) - caixa de ar (90) - 2xPGC (12,5)	140	40,0	44	49	knauf	1,56	40,00	interior	40,0
91	2xPGC (15) - caixa de ar (90) - 2xPGC (15)	150	48,0	45	49	knauf	1,47	48,00	interior	48,0

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica			
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U [W/m ² .°C]	Massa Total [kg/m ²]	Tipo de parede	Massa Superficial [kg/m ²]
92	3xPGC (12,5) - lâ mineral (70) - 3xPGC (12,5)	145	62,8	50	53	knauf	0,43	60,00	interior	60,0
93	3xPGC (15) - lâ mineral (70) - 3xPGC (15)	160	74,8	51	54	knauf	0,42	72,00	interior	72,0
94	3xPGC (12,5) - lâ mineral (90) - 3xPGC (12,5)	165	63,6	50	52	knauf	0,36	60,00	interior	60,0
95	3xPGC (15) - lâ mineral (90) - 3xPGC (15)	180	75,6	51	52	knauf	0,35	72,00	interior	72,0
96	3xPGC (12,5) - caixa de ar (70) - 3xPGC (12,5)	145	60,0	46	52	knauf	1,35	60,00	interior	60,0
97	3xPGC (15) - caixa de ar (70) - 3xPGC (15)	160	72,0	47	53	knauf	1,25	72,00	interior	72,0
98	3xPGC (12,5) - caixa de ar (90) - 3xPGC (12,5)	165	60,0	46	52	knauf	1,35	60,00	interior	60,0
99	3xPGC (15) - caixa de ar (90) - 3xPGC (15)	180	72,0	47	53	knauf	1,25	72,00	interior	72,0
100	2xPGC (12,5) - 2xlâ mineral (48) - 2xPGC (12,5)	146	43,8	48	65	knauf	0,35	40,00	interior	40,0
101	2xPGC (15) - 2xlâ mineral (48) - 2xPGC (15)	156	51,8	49	65	knauf	0,34	48,00	interior	48,0
102	2xPGC (12,5) - 2xlâ mineral (70) - 2xPGC (12,5)	190	45,6	49	66	knauf	0,25	40,00	interior	40,0
103	2xPGC (15) - 2xlâ mineral (70) - 2xPGC (15)	200	53,6	50	66	knauf	0,25	48,00	interior	48,0
104	2xPGC (12,5) - 2xlâ mineral (90) - 2xPGC (12,5)	230	47,2	49	65	knauf	0,20	40,00	interior	40,0
105	2xPGC (15) - 2xlâ mineral (90) - 2xPGC (15)	240	55,2	50	66	knauf	0,20	48,00	interior	48,0
106	2xPGC (12,5) - lâ mineral (48) - caixa de ar (54) - lâ mineral (48) - 2xPGC (12,5)	200	43,8	48	59	knauf	0,33	40,00	interior	40,0
107	2xPGC (15) - lâ mineral (48) - caixa de ar (54) - lâ mineral (48) - 2xPGC (15)	210	51,8	49	56	knauf	0,32	48,00	interior	48,0
108	2xPGC (12,5) - lâ mineral (48) - caixa de ar (14) - lâ mineral (48) - 2xPGC (12,5)	160	43,8	48	-	-	0,33	40,00	interior	40,0
109	2xPGC (15) - lâ mineral (48) - caixa de ar (4) - lâ mineral (48) - 2xPGC (15)	160	51,8	49	-	-	0,33	48,00	interior	48,0
110	PGC(12,5+10) - caixa de ar (35) - fibra de coco (40) - PGC(12,5+10)	120	40,8	46	56	isocor	0,39	36,00	interior	36,0
111	PGC (13) - caixa de ar (50) – impersom* (50) - caixa de ar (50) - PGC (13)	176	24,3	44	51	imperialum	0,51	20,8	interior	20,8
112	2xPGC (13) - caixa de ar (25) - lâ poliéster (45) - PGC (13) - imperacoustic (4) - PGC (13)	126	48,7	49	55	imperialum	0,51	41,60	interior	41,6
113	2xPGC (13) - caixa de ar (5) - lâ vidro (65) - PGC (13) - imperacoustic ** (4) - PGC (13)	126	49,3	49	56	imperialum	0,45	48,10	interior	48,1
114	2xPGC (13) - caixa de ar (20) - lâ rocha (50) - PGC (13) – imperacoustic** (4) - PGC (13)	126	51,6	48	57	imperialum	0,53	48,10	interior	48,1
115	2xPGC (15) - lâ vidro (92) - PGC (13) - imperacoustic (4) - PGC (13)	152	51,4	49	61	imperialum	0,36	49,70	interior	49,7
116	PGC (13) - caixa de ar (55) – impersom* (40) - caixa de ar (55) - PGC (13)	176	22,4	43	50	imperialum	0,58	20,80	interior	20,8
117	2xPGC (13) - lâ vidro (50) - tecsound s70*** (3,8) - 2xPGC (13) [*****]	105,8	49,4	48	51	texsa	0,58	41,6	interior	41,6
118	2xPGC (13) - lâ vidro (50) - tecsound ft40**** (14) - 2xPGC (13)	116	46,5	48	53	texsa	0,48	45,70	interior	45,7
119	2xPGC (13) - tecsound sy50***** (14) - lâ rocha (70) - tecsound sy50(14) - 2xPGC (13) [*****]	127,2	49,6	48	60	texsa	0,45	41,6	interior	41,6

Abreviaturas:

- PGC –placa de gesso cartonado;

* Impersom - placa rígida de fibras de lã de rocha aglutinadas com resina termo-endurecida;

** Imperacoustic – membrana betuminosa de alta densidade;

*** Tecsound s70 - lâmina sintética insonorizante com base polimérica de alta densidade, sem asfalto;

**** Tecsound ft40 - painel formado por um filtro poroso e por uma lâmina sintética Tecsound com base polimérica de alta densidade, sem asfalto;

***** Tecsound sy50 - lâmina sintética insonorizante com base polimérica de alta densidade, sem asfalto;

***** Desprezado a contribuição térmica do Tecsound por ser desconhecido o seu coeficiente de transmissão térmica;

A.4.1 – Pavimentos

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica					Fonte
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]	L _{w,calc} [dB(A)]	L _{w,exp} [dB(A)]	
120	laje maciça de ba (140) - corkoco (40) - caixa de ar (350) - PGC (13)	543	365,2	57	58 (-2;-9)	79	-	-
121	camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210)	250	373,0	52	53	79	75	Ricardo Mateus
122	camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	413	385,0	55	55	79	73	Ricardo Mateus
123	lajeta (40) - icb (40) - espuma polietileno (3) - camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	496	421,0	56	56	77	54	Ricardo Mateus
124	laje betão armado (200)	200	491,0	53	55	75	78	Ricardo Mateus
125	laje betão armado (200) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	363	503,0	57	57	74	76	Ricardo Mateus
126	lajeta (40) - icb (40) - espuma polietileno (3) - laje betão armado (200) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	446	539,0	57	57	73	58	Ricardo Mateus
127	piso madeira (18) - viga de Madeira (250x300) - PGC (12,5)	331	48,0	40	38	110	83	Ricardo Mateus
128	piso madeira (18) - viga de madeira (250x300) - caixa de ar (20) - lâ rocha (80)- 2xPGC (12,5)	443	62,0	45	63	106	56	Ricardo Mateus
129	tacos madeira (10) - betonilha armada (40) -	230	437,7	53	-	77	56	imperialum

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica					Fonte
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]	L _{w,calc} [dB(A)]	L _{w,exp} [dB(A)]	
	impersom (40) - laje (140)							
130	mosaico cerâmico (5) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)	225	436,6	53	-	77	58	imperialum
131	piso flutuante (6) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)	226	432,8	53	-	77	55	imperialum
132	alcatifa (6) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)	226	432,8	53	-	77	53	imperialum
133	laje (140) - caixa de ar (150) - impersom (50) - PGC (13)	353	362,4	55	-	79	61	imperialum
134	laje aligeirada com blocos de 16 cm + 4 cm de betão	200	275,0	50	51	84	-	-
135	laje aligeirada com blocos de 20 cm + 5 cm de betão	250	350,0	51	52	80	-	-
136	laje aligeirada com blocos de 30 cm + 7 cm de betão	370	600,0	55	55	72	-	-
137	laje maciça de 15 cm	150	375,0	52	52	79	-	-
138	laje maciça de 20 cm	200	500,0	54	58	75	-	-
139	laje maciça de 30 cm	300	750,0	56	65	68	-	-

A.4.2 – Pavimentos

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Térmica							
			Exterior		Interior		Massa Total		Massa Superficial	
			U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]	Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]
120	laje maciça de ba (140) - Corkoco (40) - caixa de ar (350) - PGC (13)	543	0,77	0,70	0,74	0,64	10,4	360,4	10,4	300,0
121	camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210)	250	2,70	2,22	2,33	1,72	373,0	373,0	150,0	300,0
122	camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	413	0,83	0,78	0,79	0,71	10,0	383,0	10,0	300,0
123	lajeta (40) - icb (40) - espuma polietileno (3) - camada de compressão com armadura de distribuição (40) - bloco cerâmico de cofragem com vigotas pré-esforçadas (210) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	496	0,78	0,73	0,74	0,67	10,0	18,0	10,0	18,0
124	laje betão armado (200)	200	4,55	3,45	3,57	2,38	491,0	491,0	150,0	300,0
125	laje betão armado (200) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	363	0,95	0,84	0,90	0,76	10,0	501,0	10,0	300,0
126	lajeta (40) - icb (40) - espuma polietileno (3) – laje betão armado (200) - caixa de ar (125) - lâ rocha (25) - PGC (12,5)	446	0,49	0,46	0,48	0,44	10,0	18,0	10,0	18,0
127	piso madeira (18) - viga de Madeira (250x300) - PGC (12,5)	331	-	-	1,82	1,45	0,0	48,0	0,0	48,0
128	piso madeira (18) - viga de madeira (250x300) - caixa de ar (20) - lâ rocha (80)- 2xPGC (12,5)	443	-	-	0,38	0,36	0,0	58,0	0,0	58,0
129	tacos madeira (10) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)	230	-	-	0,74	0,67	0,0	436,1	0,0	300,0

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Térmica							
			Exterior		Interior		Massa Total		Massa Superficial	
			U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]	Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]
130	mosaico cerâmico (5) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)	225	-	-	0,77	0,70	0,0	435,0	0,0	300,0
131	piso flutuante (6) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)	226	-	-	0,57	0,53	0,0	431,2	0,0	300,0
132	alcatifa (6) - betonilha armada (40) - impersom (40) - laje (140)	226	-	-	0,72	0,66	0,0	431,2	0,0	300,0
133	laje (140) - caixa de ar (150) – impersom* (50) - PGC (13)	353	0,60	0,56	0,58	0,52	10,4	360,4	10,4	300,0
134	laje aligeirada com blocos de 16 cm + 4 cm de betão	200	2,27	1,96	2,00	1,56	275,0	275,0	137,5	275,0
135	laje aligeirada com blocos de 20 cm + 5 cm de betão	250	2,70	2,22	2,33	1,72	350,0	350,0	150,0	300,0
136	laje aligeirada com blocos de 30 cm + 7 cm de betão	370	2,17	1,79	1,92	1,45	600,0	600,0	150,0	300,0
137	laje maciça de 15 cm	150	5,00	3,70	3,85	2,50	375,0	375,0	150,0	300,0
138	laje maciça de 20 cm	200	4,55	3,45	3,57	2,38	500,0	500,0	150,0	300,0
139	laje maciça de 30 cm	300	3,85	3,03	3,13	2,17	750,0	750,0	150,0	300,0

Abreviaturas:

- PGC –placa de gesso cartonado;
- icb – aglomerado negro de cortiça;

* Impersom - placa rígida de fibras de lã de rocha aglutinadas com resina termo-endurecida;

A.5.1 – Revestimentos de Piso

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	ΔL _{w, exp} [dB(A)]	
140	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - betão leve (1 cimento, 2 areia, 5 regranulado cortiça) (70) - betão regularização (10) - laje betão (140)	270	173,0	47	16	isocor
141	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - betão leve (1 cimento, 2 areia, 5 regranulado cortiça) (70) - icb (20) - betão regularização (10) - laje betão (140)	290	174,8	47	23	isocor
142	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - TR FLOOR+ (5) - laje betão (140)	195	90,2	44	26	tripolux
143	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de polietileno reticulado de 5 mm)	185	84,7	43	18	Diogo Mateus
144	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de 15 mm tipo Aglomex da Flex2000)	195	9,1	30	25	Diogo Mateus
145	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de 30 mm tipo Aglomex da Flex2000)	210	10,2	31	27	Diogo Mateus
146	parquet flutuante - membrana de polietileno reticulado de 3 mm - laje betão (140)	153	8,1	30	18	Diogo Mateus
147	pavimento Flutuante Acousticork® NRT Series 3000 - laje betão (140)	152	9,5	31	19	Wincaders
148	pavimento Flutuante Woodcomfort Floating WRT - laje betão (140)	152	9,5	31	15	Wincaders
149	pavimento Flutuante Xtreme WRT series 100 - laje betão (140)	151	7,7	29	16	Wincaders

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	ΔL _{w, exp} [dB(A)]	
150	pavimento Flutuante Xtreme WRT series 300 - laje betão (140)	152	9,3	31	15	Wincaders

A.5.2 – Revestimentos de Piso

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Térmica								
			Exterior		Interior		Massa Total		Resistência Térmica do Revestimento Superficial [m².°C/W]	Massa Superficial	
			U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]		Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]
140	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - betão leve (1 cimento, 2 areia, 5 regranulado cortiça) (70) - betão regularização (10) - laje betão (140)	270	-	-	1,77	1,42	173,0	173,0	0,04	150,0	173,0
141	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - betão leve (1 cimento, 2 areia, 5 regranulado cortiça) (70) - icb (20) - betão regularização (10) - laje betão (140)	290	-	-	0,99	0,87	174,8	174,8	0,04	150,0	174,8
142	tacos de pinho (10) - lajeta de betão (40) - TR FLOOR+ (5) - laje betão (140)	195	-	-	0,90	0,80	0,0	440,2	0,04	0,0	300,0
143	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de polietileno reticulado de 5 mm)	185	3,78	2,99	3,08	2,15	0,0	80,0	0,02	0,0	80,0
144	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de 15 mm tipo Aglomex da Flex2000)	195	1,85	1,64	1,67	1,35	80,0	430,0	0,02	80,0	300,0
145	lajeta flutuante (40) - laje de betão (140) (sobre membrana de 30 mm tipo Aglomex da Flex2000)	210	1,09	1,02	1,03	0,90	80,0	430,0	0,02	80,0	300,0
146	parquet flutuante - membrana de polietileno reticulado de 3 mm - laje betão (140)	153	-	-	2,97	2,10	0,0	358,0	0,08	0,0	300,0
147	pavimento Flutuante Acousticork® NRT Series 3000 - laje betão (140)	152	-	-	2,81	2,02	0,0	359,5	0,16	0,0	300,0
148	pavimento Flutuante Woodcomfort Floating WRT - laje betão (140)	152	-	-	3,01	2,12	0,0	359,5	0,13	0,0	300,0
149	pavimento Flutuante Xtreme WRT series 100	151	-	-	3,21	2,21	0,0	357,7	0,11	0,0	300,0

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Térmica								
			Exterior		Interior		Massa Total		Resistência Térmica do Revestimento Superficial [m².°C/W]	Massa Superficial	
			U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	U Ascendente [W/m².°C]	U Descendente [W/m².°C]	Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]		Exterior [kg/m²]	Interior [kg/m²]
	- laje betão (140)										
150	pavimento Flutuante Xtreme WRT series 300 - laje betão (140)	152	-	-	3,26	2,24	0,0	359,3	0,11	0,0	300,0

A.6 – Envidraçados

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica		
			Massa Superficial [kg/m²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U (Ar) [W/m².ºC]	U (Árgon) [W/m².ºC]	U (ITE-50) [W/m².ºC]
Vidro Normal:									
151	6+12+8	26	35,0	38	31	C.M. Serpa	-	-	2,5
152	4	4	10,0	31	28	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	3,6
153	6	6	15,0	33	29	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	3,6
154	8+20+4	32	30,0	37	31	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	2,5
155	8+20+6	34	35,0	38	32	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	2,5
156	8+50+4	62	30,0	37	33	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	2,5
157	8+50+6	64	35,0	38	33	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	2,5
158	8+100+4	112	30,0	37	33	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	2,5
159	8+100+6	114	35,0	38	33	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	2,5
160	3*	3	7,5	29	29 (-2;-5)	Saint Gobain	5,8	-	3,6
161	4*	4	10,0	31	30 (-1;-3)	Saint Gobain	5,8	-	3,6
162	5*	5	12,5	32	30 (-1;-2)	Saint Gobain	5,8	-	3,6
163	6*	6	15,0	33	31 (-1;-2)	Saint Gobain	5,7	-	3,6
164	8*	8	20,0	35	32 (-1;-2)	Saint Gobain	5,7	-	3,6
165	10*	10	25,0	36	33 (-1;-2)	Saint Gobain	5,6	-	3,6
166	12*	12	30,0	37	34 (0;-2)	Saint Gobain	5,5	-	3,6
167	15*	15	37,5	39	36 (-1;-3)	Saint Gobain	5,5	-	3,6
168	19*	19	47,5	40	37 (-1;-3)	Saint Gobain	5,3	-	3,6
169	6+6+4*	16	25,0	36	34 (-1;-4)	Saint Gobain	3,3	-	2,7
170	10+6+4*	20	35,0	38	35 (0;-3)	Saint Gobain	3,2	-	2,7
171	10+12+4*	26	40,0	39	37 (-1;-4)	Saint Gobain	2,8	-	2,5
172	4+6+4*	14	20,0	35	30 (-1;-3)	Saint Gobain	3,3	-	2,7
173	4+12+4*	20	20,0	35	30 (0;-3)	Saint Gobain	2,9	-	2,5
174	4+16+4*	24	20,0	35	30 (0;-3)	Saint Gobain	2,7	-	2,5
175	6+12+6*	24	30,0	37	33 (-1;-3)	Saint Gobain	2,8	-	2,5
176	4+12+8**	24	30,0	37	34 (-1;-4)	Saint Gobain	1,6	1,3	2,5

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica		
			Massa Superficial [kg/m²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U (Ar) [W/m².°C]	U (Árgon) [W/m².°C]	U (ITE-50) [W/m².°C]
177	4+16+8**	28	30,0	37	35 (-1;-5)	Saint Gobain	1,4	1,1	2,5
178	6+12+10**	28	30,0	37	37 (-1;-4)	Saint Gobain	1,6	1,3	2,5
179	4+12+4**	20	20,0	35	30 (0;-3)	Saint Gobain	1,7	1,3	2,5
180	4+15+4**	23	20,0	35	30 (0;-3)	Saint Gobain	1,4	1,1	2,5
181	4+16+4**	24	20,0	35	30 (0;-3)	Saint Gobain	1,4	1,1	2,5
182	6+12+6**	24	30,0	37	33 (-1;-3)	Saint Gobain	1,6	1,3	2,5
183	6+15+6**	27	30,0	37	33 (-1;-5)	Saint Gobain	1,4	1,1	2,5
184	6+16+6**	28	30,0	37	33 (-1;-5)	Saint Gobain	1,4	1,1	2,5
185	4+10+6**	20	25,0	36	34 (-1;-4)	Saint Gobain	1,8	1,4	2,5
186	4+12+8**	24	30,0	37	34 (-1;-4)	Saint Gobain	1,6	1,3	2,5
187	4+16+8**	28	30,0	37	35 (-1;-5)	Saint Gobain	1,4	1,1	2,5
Vidro Laminado:									
188	6	6	15,0	33	31	Marco Aurélio de Oliveira	-	-	3,6
189	33.1A***	6	15,5	34	36 (-1;-3)	Saint Gobain	5,7	-	3,6
190	44.1A***	8	20,5	35	37 (-1;-2)	Saint Gobain	5,7	-	3,6
191	55.1A***	10	25,5	36	38 (-1;-2)	Saint Gobain	5,6	-	3,6
192	66.1A***	12	30,5	37	39 (0;-3)	Saint Gobain	5,5	-	3,6
193	33.2A***	7	16,0	34	36 (-1;-3)	Saint Gobain	5,7	-	3,6
194	44.2A***	9	21,0	35	37 (-1;-2)	Saint Gobain	5,7	-	3,6
195	55.2A***	11	26,0	36	38 (-1;-2)	Saint Gobain	5,6	-	3,6
196	66.2A***	13	31,0	37	39 (-1;-2)	Saint Gobain	5,5	-	3,6
Vidro Normal Exterior e Laminado Interior:									
197	4+12+33.1A****	22	25,5	36	34 (-1;-4)	Saint Gobain	2,8	-	2,5
198	6+12+33.1A****	24	30,5	37	37 (-1;-5)	Saint Gobain	2,8	-	2,5
199	6+12+44.1A****	26	35,5	38	38 (-1;-5)	Saint Gobain	2,8	-	2,5
200	8+12+44.1A****	28	40,5	39	40 (-2;-5)	Saint Gobain	2,8	-	2,5
201	10+12+44.1 A****	30	45,5	40	42 (-1;-5)	Saint Gobain	2,8	-	2,5

Nº	Descrição	Espessura [mm]	Acústica			Fonte	Térmica		
			Massa Superficial [kg/m ²]	R _{w,calc} [dB(A)]	R _{w,exp} [dB(A)]		U (Ar) [W/m ² .°C]	U (Árgon) [W/m ² .°C]	U (ITE-50) [W/m ² .°C]
202	6+16+44.2A****	31	36,0	38	39 (-2;-6)	Saint Gobain	2,7	-	2,5
203	10+12+44.2A****	31	46,0	40	42 (-2;-5)	Saint Gobain	2,8	-	2,5
Envidraçado com Caixilharia:									
204	Vidro duplo 6+(10)+4 mm em caixilho tipo A3	20	25,0	36	30(-1;-2)	Diogo Mateus	-	-	2,5
205	Vidro duplo 8+(12)+6 mm em caixilho tipo A3	26	35,0	38	35(-2;-5)	Diogo Mateus	-	-	2,5
206	Vidro duplo 55.1+(12)+8mm em Caixilho C. A3	30	55,0	41	40(-2;-3)	Diogo Mateus	-	-	2,5
207	Janela dupla com um vidro duplo 8+(10)+6mm + 2ª janela com vidro simples de 8 mm, em Caixilhos Classe A3	48	55,0	46	47(-2;-6)	Diogo Mateus	-	-	1,45

Obs. Na designação dos vidros os números correspondem ao seguinte código: espessura em mm do vidro exterior + espessura em mm da caixa de ar ou árgon + espessura em mm do vidro interior

* Planilux – vidro de base incolor e transparente;

** Planistar - vidro exterior com uma capa fina e transparente composta por materiais de origem metálica dando ao vidro uma baixa emissividade (reflecte os raios infravermelhos de grande comprimento de onda) e controlo solar (reflecte uma parte importante da energia solar);

*** STADIP (A) - duas chapas de vidro solidarizadas por um filme de butiral de polivinilo acústico, tendo cada filme 0,36 mm de espessura;

**** Planilux + STADIP (A);